

城市综合能源系统韧性评估与提升综述

张儒峰*, 李雪, 姜涛, 陈厚合

(东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Review on Resilience Assessment and Enhancement of Urban Integrated Energy System

ZHANG Rufeng*, LI Xue, JIANG Tao, CHEN Houhe

(Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

Abstract: Under extreme disturbance accidents, the urban integrated energy system is prone to serious accidents where a large number of components fail at the same time, which seriously threatens the safety and reliability of the energy supply of the urban integrated energy system. Resilience is used to describe the ability of the system to withstand disturbances and quickly return to normal operation. Therefore, accurate assessment and effective resilience enhancement measures are important means to enhance the anti-disturbance ability of the urban integrated energy system. This article briefly describes the specific definition of resilience and the impact mechanism of resilience of the urban integrated energy system. Then, it summarizes the existing resilience assessment methods, load recovery strategies and resilience enhancement measures, and summarizes the existing methods to provide reference for the research on resilience assessment and enhancement methods.

Keywords: extreme disturbance; urban integrated energy system; resilience assessment; resilience enhancement

摘 要: 极端扰动事故下, 城市综合能源系统易发生大量元件同时故障的严重事故, 严重威胁城市综合能源系统供能的安全性和可靠性。韧性是用于描述系统抵御扰动并快速恢复到正常运行状态的能力, 因此, 准确的韧性评估和有效的韧性提升措施是增强城市综合能源系统抵御供能中断能力的重要手段。在简述了城市综合能源系统韧性的定义和城市综合能源系统韧性的影响因素基础上, 对目前存在的韧性评估方法、负荷恢复策略和韧性提升措施进行综述, 总结了目前的研究现状, 为后续城市综合能源系统的韧性评估和提升方法研究提供一定的参考。

关键词: 极端扰动; 城市综合能源系统; 韧性评估; 韧性提升

0 引言

近些年, 日益恶化的环境以及传统能源的逐渐枯竭是全球面临的主要问题。风电和光伏等可再生能源成为各个国家重点发展对象, 但是由于其具有较大的波动性与随机性, 大规模接入电网会极大影响电网的安全可靠运行^[1]。伴随着互联网和智能电网的发展, 以多能协同和互联为特点的综合能源系统应运而生^[2]。综合能源系统是通过对能源的产生、分配、转换和消费等环节进行有机交互与协调优化进而促进能源的互联, 并能够充分发挥多能源协调的耦合特性, 从而形成的产、供、销一体化的能源系统^[3-4], 可实现能效的有效提高^[5]。综合能源系统是近年来提出的关于能源供给体系的创新概念, 是能源供给侧改革的一个重要抓手^[6-8]。城市综合能源系统是未来城市能源网的重点发展方向, 以电力为主体并融合天然气和热能等多种能源形式的城市综合能源系统将成为未来城市能源供应的重要发展趋势。

近年来, 虽然各国电网的运行可靠性持续增强, 但自然灾害、连锁故障和网络攻击等极端事件频发, 极易造成大规模停电事故, 给社会带来巨大的影响和损失。为应对此类事故, 学术界与工业界共同提出了“韧性”概念, 并拓展为一个新的研究领域。韧性, 也称恢复力, 通常被定义为“预防和适应环境变化、承受扰动以及快速恢复的能力^[9], 考虑的扰动包括蓄意攻击、意外故障以及自然灾害”。对于城市综合能源系统, 2011年3月, 日本仙台地区发生9.0级地震, 共造成天然气管道破裂84处, 导致多地发生火灾^[10]; 2015年, 因网络攻击导致乌克兰出现大规模停电事故^[11]; 2016年9月, 澳大利亚南部地区的电网因台风和暴雨的影响, 大量的燃气轮机与主网脱离, 事故发

基金项目: 国家自然科学基金 (52061635103, 52077029, 52007026)。

National Natural Science Foundation of China (52061635103, 52077029, 52007026).

生50 h后才恢复供电^[12]；2018年3月21日，巴西电网发生大面积停电事故^[13]；2019年7月13日，美国纽约发生大停电事故^[14]；2019年8月，台湾省宜兰县海域发生里氏6.4级地震，造成附近市区的电线杆塔损坏2件、输电线路断裂1条，导致超过700户居民遭受停电事故，燃气管道破裂3处，燃气泄漏导致地面隆起，送水管道多处破裂导致路面大面积渗水^[15]；2019年8月9日，英国伦敦发生停电故障^[16]。上述案例清楚地表明现代城市综合能源系统易受极端故障场景威胁，如何在外部主电网故障或其他极端故障场景下实现重要负荷的持续、可靠供电，提高系统安全性和韧性仍有待进一步研究。

作为面向用户的关键环节，在极端条件下，城市综合能源系统能够正常运行对于保障人们的生活，保证社会供能系统的安全可靠运行有重要意义。城市综合能源系统面对极端场景的抵御能力受到了广泛的关注，随着高比例可再生能源的接入和多能源之间耦合的不断深化，城市综合能源系统安全运行和控制面临更高的要求。对于城市综合能源系统而言，工业、商业和民用负荷等终端负荷大规模接入，多能源网络交互耦合，能源网络结构高度复杂，调节、响应能力和手段有限，提高城市综合能源系统的韧性具有重要的经济、环境和社会意义^[17]。本文以城市综合能源系统为主体，对城市综合能源系统韧性的内涵、韧性评估理论和韧性提升方法进行了综述。

1 韧性定义及城市综合能源系统研究现状

1.1 韧性定义内涵

韧性最初的概念是由加拿大生物学家Holling于1973年提出的，用来衡量生态系统抵御干扰并保持原有状态的能力^[18]。此后，关于韧性的各种定义在不同领域有了显著的演变，如环境科学^[19]、社会学^[20]、工业^[21]、经济等。在电网、天然气网络和供暖系统等关键能源基础设施中，世界范围内的电力和能源工程界已进行了各种尝试，以确定能源基础设施的韧性。例如，根据IEEE电力和能源社会工作组定义和量化的韧性，韧性的是指承受能力的大小和/或持续时间，减少破坏性事件发生，其中包括预测的能力、吸收、迅速适应和/或恢复此类事件^[22]。然而，这些定义有一个共同的理解，即关注基础设施或系统准备和适应低概率高影响事件的能力，以及承受中断并迅速恢复的能力。系统发生扰动前至扰动发生后通过故障恢复使得

系统恢复正常运行状态的功能曲线如图1所示。

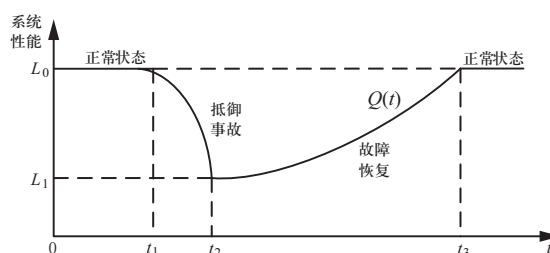


图1 扰动事件发生过程中系统功能曲线

Fig. 1 Function curve of the system during the occurrence of disturbance events

韧性过程包括扰动事件发生前的预防阶段、过程中的抵御阶段以及结束后的恢复阶段^[23]。对城市综合能源系统而言，图1中 $Q(t)$ 为城市综合能源系统性能函数，通常可以选取系统的负荷量等参数。在扰动事故发生(t_1 时刻)前，城市综合能源系统中各子系统均正常运行，均可保证对负荷的正常供电，故系统性能函数处于正常水平 L_0 。扰动事故发生(t_1 时刻)后，系统中保护装置动作且控制策略实施致使城市综合能源系统中部分负荷中断供电，性能函数即迅速下降至 L_1 。 t_2 时刻采取一定的恢复策略，系统功能开始逐渐恢复， t_3 时刻系统恢复到正常运行状态。

1.2 城市综合能源系统研究现状

为了应对化石能源的大幅度减少及其带来的全球环境问题，综合能源系统应运而生。综合能源系统即在区域内通过对电能、天然气以及热能等能源进行整合，采用特定管理方式及信息技术，协调规划各能源子系统并实现各子系统间的优化运行。

城市综合能源系统作为综合能源系统的重要组成部分，将电力系统作为核心环节，深度融合城市电力、天然气、热力、风能、太阳能等能源，进而实现城市能源的统一规划^[24]。而传统的城市能源系统规划以单一网络为主，各个网络之间缺乏联系，一旦能源网络被破坏，可能导致整个系统崩溃，导致大面积停电。此外，传统的城市能源网中能源综合利用率较为低下，同时存在着自动化水平不足以及可再生能源消纳力差等问题。文献[25]从建设智能能源生产和消费基础设施、构建多能源协同集成能源网络和培育可再生能源等角度，完善城市新能源体系，构建绿色、智能、高效、集中化的新型城市综合能源体系。构建完整的城市综合能源系统有利于提高各能源子系统间的协调运行，提高供电的可靠性和韧性。

城市综合能源系统中,不同能流系统具有显著不同的动态过程,故研究多能耦合特性对城市综合能源系统韧性影响的前提是准确、高效地对系统进行建模。针对网络侧,天然气、热力系统具有传输慢、惯性大等动态特性,其延时效应可等效为系统的储能,进而提升系统运行的灵活性^[26-27]。目前,针对热网动态特性的研究主要集中于利用其动态特性进行优化调度,提高系统运行经济性和可再生能源的消纳能力^[28-32]。在文献[28-29]中,为提高系统的风电接纳能力,计及热网传输延时和温度损耗,将其虚拟储热能力用于“热电解耦”;在文献[30-32]中,提出了一种热电联合运行模式,该运行模式综合考虑建筑物与热网动态特性,能够有效地减小系统的运行成本。针对天然气网动态特性,目前也已有诸多研究,同样主要集中于利用其虚拟储能特性进行优化运行。文献[33]在电-气互联系统中考虑了天然气网络的动态过程,证明了忽略管道储存能力及天然气慢传输速度的稳态模型,会导致次优的或不准确的调度方案;文献[34]提出了考虑气网管存的线性化模型,证明了管存容量对能源供应充裕度有重要的作用;文献[35]分析了由电转气与热电联产机组双向耦合的电-气互联系统的动态最优能量流。以上研究证明了天然气网络和供热网络的动态特性可为综合能源系统提供响应能力。

对于负荷侧,建筑集群是城市综合能源系统中重要的耗能单元,建筑结构具有热惰性的特性,该特性表现为类似储能装置的蓄放能行为,可以将其作为“虚拟储能”资源^[36-37],同样可为城市综合能源系统提供响应能力,提高系统运行灵活性。目前对于建筑集群虚拟储能特性的研究主要集中于利用其进行综合能源系统优化调度^[38-40]。在文献[38-39]中,提出了基于建筑等效热容热阻的一阶状态模型,利用其表示室温变化与制冷采暖功率之间的关系;在文献[40]中,建立了一阶等效模型,该模型针对地板辐射供暖系统,可将其应用于住宅微电网的优化调度中。然而,以上建模研究主要面向系统优化调度,未对耦合元件的能量转换关系进行详细分析与建模,难以直接分析多能耦合特性对系统韧性的影响机理。

针对韧性影响机理方面的研究,文献[41]考虑了信息安全对于电网韧性的影响,提出一种提升韧性的最优潮流模型;文献[42]提出一种考虑连锁故障的电力系统韧性约束最优经济运行方法。但以上研究均针对提升电力系统韧性的控制策略方面开展研究工作,未考虑能源系统间故障的关联性和传播特性,多能耦

合特性对韧性影响机理方面的研究仍有待于进一步开展。

本文所研究的城市综合能源系统为处于能源供给末梢的综合能源系统,后文所涉及韧性评估以及韧性提升均针对配电、配气以及配热系统,未对输网侧故障的问题进行综述。

综上所述,目前对于城市综合能源系统建模和韧性影响机理方面已有一定研究,但所研究对象为配网侧且研究大多集中于利用多能耦合和静态特性进行优化调度,提升系统运行经济性和可再生能源消纳能力,尚缺乏以城市综合能源系统为对象,深入分析多能耦合特性对城市综合能源系统韧性影响机理的研究。

2 城市综合能源系统韧性评估方法

韧性可描述城市综合能源系统在遭受自然灾害等极端事件或连锁故障条件下能否对系统持续供能,并在最大程度上缩小负荷供能中断的时间以及范围,使得系统快速恢复到正常运行状态的能力。城市综合能源系统结构异常复杂,且直接面向用户,如何准确评估其韧性,对城市综合能源系统的规划以及运行等方面意义重大。目前已有韧性评估方面的研究主要针对城市配电网,仅有极少学者对城市能源系统韧性评估进行研究。

韧性指标体系作为城市综合能源系统韧性评估的基础,应具备表征系统的负荷状态和系统的恢复情况的能力。现有针对韧性评估指标的研究主要集中于考虑自然灾害或连锁故障情况下评估配电网的韧性情况。文献[43-44]中通过系统功能函数表征韧性,并提出了韧性评估过程中3个核心指标:吸收率、适应率和修复速率,并构成韧性三角形。文献[45-46]中,将韧性定义为规定时间内系统的负荷恢复量与系统初始状态时因故障损失负荷量的比值。在此基础上,文献[47]提出了一种韧性评估矩阵,基于面积、概率和调控成本定义了韧性指标。文献[48-51]在上述韧性评估方法的基础上,对极端灾害下的系统韧性进行考量。文献[48]提供了一种适用于多种极端灾害同时作用下的电网韧性指标计算方法。文献[49]中,通过系统可承受的最长修复时间和系统失负荷的严重程度指标来反映电网对极端自然灾害的抵御能力。文献[50]进一步提出了一种新的韧性评估指标,该指标考虑了极端自然灾害对不同线路故障的影响,最后,将韧性指标

应用于综合能源系统中。文献[51]提出了电-气综合能源系统的恢复力指标体系，分别从网架坚强性和负荷损失情况角度提出了一系列韧性指标。

在上述韧性评估基本方法的基础上，对于传统配电网，下述文献对其系统韧性进行评估，且已经形成较为成熟的评估体系。文献[52]对目前配电网故障发生前的扰动事件、系统韧性评估理论以及对应的提升策略进行了阐述。文献[53]分析了台风等自然灾害对电网故障的影响，并对二者间时空分布特性进行建模。文献[54]提出多种极端灾害作用下的电网韧性计算方法。文献[55]提出一种极端天气条件下的配电网韧性分析方法，并提出韧性提升措施。然而，以上研究主要针对配电网进行韧性评估，对于城市综合能源系统，扰动事件和连锁故障引起的供能影响具有不同时空分布特性、不同快慢动态和不同能级负荷损失，尚缺乏考虑多能耦合特性、负荷时空分布及能效分级特性的面向城市综合能源系统的韧性评估指标体系。

综上，目前国内外对于城市综合能源系统韧性评估已有初步进展，但多数文献主要集中于城市配电网的韧性评估方法研究，尚缺乏以城市综合能源系统为主体，考虑多能源网络交互耦合特性、不同能源网络动态快慢特性影响下，计及不同能源负荷优先级与能级的城市综合能源系统韧性评估方法。

3 城市综合能源系统负荷恢复策略

提升负荷供电恢复能力作为提升能源系统韧性的核心手段之一，对于满足用户能源供应及需求具有重要意义。供电恢复即在故障情况下，通过开关操作进行网络重构，在保证系统安全的条件下对非故障失电区域进行快速恢复供电^[56]。

目前较多学者所采用的方法可概括为通过优化方法求解数学模型、通过启发式信息搜索最优解以及计算机技术中所采用的人工智能算法。以上方法均为通过算法本身进行优化，在上述方法基础上部分学者又将分布式电源等可调节的“灵活源”以及部分电力电子器件等引入供电恢复问题。

文献[57]中所采用的数学优化方法凭借其传统且直观的特点较早的被应用于求解供电恢复问题，但该类优化问题包含多目标函数以及约束条件，当数学模型求解精度高时，计算较为耗时，且其最优解的得到取决于所采用模型的精确程度。

启发式方法专业性较强且具备实用性与实时性的特点，该方法在搜索过程中加入具备启发意义的信息并按此方向进行搜索，以便快速且准确地得到最优解，在供电恢复问题中亦有较为广泛的应用。众多学者也将启发式算法同图论理论相结合用于供电恢复问题的求解。文献[58-60]均应用图论理论中的最小生成树的方法求解供电恢复问题。其不同之处在于文献[58]为对供电恢复问题转化后的待切割树进行求解；文献[59]在最小生成树方法的基础上以图论中的Prim算法为基础进行优化，进而得到最优的开关控制策略以及相应的供电恢复策略。文献[61]同样应用图论理论，采用由系统拓扑形成开关集合并在其中搜寻最优解的方法，具有较高的效率。

随后，众多学者在计算机技术的进步下开始将人工智能算法应用于供电恢复问题。文献[62]中采用粒子群算法并对其进行优化求解。文献[63]采用人工智能的方法对多故障抢修先后顺序问题进行建模并求解。文献[64]通过人工智能算法转移负荷并最小化失电区域，进而得到最优供电恢复策略。以上算法各有其优缺点以及适应场景，部分学者亦将上述方法结合，进而实现更好的供电恢复效果^[65-67]。

如今，分布式电源（distributed generation, DG）以及储能设备等可调节电源逐渐被接入电网，日渐在供电恢复中发挥其作用^[68-70]。近两年研究多集中在考虑多能源调节手段协同以及通过网络重构转移负荷的方法解决供电恢复问题。在当前技术条件下，多能源调节手段协同以提高供电恢复的快速性为侧重点，而通过网络重构转移负荷是实现城市能源系统故障自愈、供电可靠性提升的重要手段。文献[71]建立了网络重构和分布式电源的协同供电恢复模型；文献[72]采用网络重构改变拓扑结构进行供电恢复，并通过鲁棒优化保证分布式电源和负荷出力波动时供电恢复策略的有效性；文献[73]针对系统出现的极端故障情况，运用基于生成树的网络重构方法，采用分布式电源为失电负荷提供功率支撑。

随着电力电子技术的发展，柔性配电装置逐渐被应用于供电恢复技术。文献[74]通过智能软开关中背对背式换流器的控制模式，提出了SOP的控制模式，分别应用于系统正常运行时的潮流控制过程以及故障后供电恢复过程；文献[75]提出了基于SOP的有源配电网供电恢复流程以及不同控制模式下SOP的运行约束，并以恢复负荷量最大为目标函数，通过锥优化求解。

一方面,城市综合能源系统相对于传统综合能源系统,其用户端用能特性更为随机,以冷/热以及电动汽车为代表的用户端亦对韧性提升效果存在影响。文献[76]中考虑在传统配电网中将电动汽车作为应急资源,对其进行优化调度进而将其用于供电恢复问题,通过提升其负荷恢复比例进而提升韧性。文献[77]建立了含电动汽车以及储能设备的配电网鲁棒孤岛优化模型用于求解供电恢复问题。

另一方面,城市综合能源系统各能源子系统的耦合特性使得各类耦合装置也应用于韧性提升问题之中。其耦合方式大体分为两种:一种为通过单装置进行单项耦合,主要为燃气轮机以及电转气装置(P2G)装置等;另一种为通过能源集线器进行耦合,主要包括热电联产机组以及电制冷机等。某一子系统发生故障时,部分耦合装置可能停止工作,进而故障扩散到其他子系统产生连锁故障。通过应用合理的韧性提升策略将某一系统故障恢复,进而耦合装置恢复工作,各系统恢复正常运行。文献[78]中考虑气驱动燃气轮机以及P2G装置的双向耦合特性,实现了电力网络以及天然气网络的协同故障恢复,进而提升系统韧性。后续研究中,各网络协同进行韧性提升仍为城市综合能源系统中韧性提升问题的重点。

对于韧性的三个阶段研究,都是针对电/气/热三个子系统以及其深度耦合后的城市综合能源系统。同时,目前概率、场景等数学方法同样应用于韧性分析。

以上研究中采用不同方法实现供电恢复问题的求解,针对供电恢复策略进行优化,而以城市综合能源系统为对象进行多能源负荷恢复策略研究尚处于起步阶段。

4 城市综合能源系统韧性提升方法

城市综合能源系统中包括高度耦合的多能源子网络,已有研究多数集中于电力系统,例如配电网规划、韧性提升方法及利用分布式电源和微网对电力系统进行韧性提升等。在配电网规划方面:文献[79]通过将输电线路加固和加快故障维修速度等措施来研究不同台风强度下韧性提升效果。文献[80]进一步提出了一个三阶段优化模型,通过选择最佳的元件加固位置和加固策略来提高配电网的韧性。文献[81]提出了一种两阶段随机优化模型,辅助决策车载移动应急发电机的配置问题,以提高韧性响应速度。在利用分

布式电源方面,文献[82]通过考虑可再生能源不确定性的多代理系统方法解决恢复供电问题,并将储能装置作为灵活性资源解决系统的不确定性问题。文献[83]采用了两阶段方法制定协调多个分布式电源的故障恢复策略。文献[84-85]采用了一种线性模型,利用分布式电源形成微电网以解决关键负荷的供电问题。文献[86]中将恢复供电任务定义为一个多目标优化问题,研究电动汽车V2G设施对服务恢复的影响。文献[87]提出在优化中考虑负荷需求和可再生能源的不确定性。文献[88]中通过整合分布式电源、储能装置及负荷,采取有功和无功控制、电压控制和频率控制等手段,利用Multi-Agent免疫算法提高配电系统自愈能力。在微网方面,文献[89]提出了一种多微网的分层停电管理方案,解决了极端灾害条件下微电网之间功率传输的问题。在文献[90]中提出了一种利用并网型微电网解决配电网故障恢复问题的方案。文献[91]提出了一种基于韧性的方法,即在极端灾害发生后,利用微电网恢复配电馈线的重要负荷。文献[92]中开发了一个动态改变MGs边界的框架,用于故障隔离和负载恢复。在文献[93]中提出了一个顺序服务恢复框架来生成一系列的控制动作,包括交换机、DGs和可切换负载,以形成多个独立的MGs。

城市综合能源系统的韧性提升策略研究尚未成熟,目前已有研究中文献[94]考虑了区域-地区综合能源系统之间的交互支撑关系,提出一种自然灾害条件下的综合能源系统韧性提升策略。文献[95-96]分别提出了多能源微网和电-气综合能源系统的韧性运行与提升策略。文献[97-98]提出可通过加强极端事件发生前的预防措施对综合能源系统的韧性进行提升。在文献[99]中,提出了天然气系统的韧性评估方法,该方法基于生态网络分析。在文献[100]中,以德国东北部的天然气系统为例对天然气需求不确定性下系统的韧性进行了研究。文献[101]提出一种基于韧性约束的最小补偿鲁棒性模型,以提高电力系统和天然气系统的韧性。综合能源系统的韧性研究方面,文献[102]研究了天然气系统发生故障对电-气-热耦合的综合能源系统韧性的影响,并研究了如何利用天然气管道提升综合能源系统的韧性。根据文献[103],提出了一种电-气综合能源系统的三阶段鲁棒优化模型,该模型以负荷削减量最小为目标函数,以提升整个综合能源系统的韧性。需要特别注意的是,针对某一种特定的威胁,其对应的预防措施可能会在其他场合中产生负面的效应。例如,建设地下线路可以增强系统对台风的

基础设施韧性,但是在地震情况下,受损线路的修复时间却会变得 longer^[104-105]。

随着储能技术的不断进步与发展,将储能装置作为城市综合能源系统中的备用能源应用于韧性提升问题也可取得较好的效果。目前储能装置包括储电、储气、储热以及储冷设备等。储电装置多为燃料电池等,当储电装置同电网相连时,可以帮助电网提升负荷恢复率、使得DG出力更为稳定,此外,对于孤岛恢复供电问题时,其也可同DG装置共同形成源。储气装置多为储气罐等设备,其可以起到调节天然气源的出力的作用。储热储冷装置通常即为蓄热以及蓄冷装置,通过能源站等实现电-热-冷之间的转化。文献[106]中构建了铅酸电池以及储气罐设备模型,并构建双层模型对电气耦合综合能源系统故障恢复问题进行求解,各子系统恢复供电百分比以及恢复供气百分比均有了较大提升,若考虑其对韧性的提升作用也可取得较好效果。文献[107]提出了考虑冷-热-电存储的综合能源站构建方法,将其应用于韧性恢复方向仍有待于后续研究。另外,部分学者将各类储能装置相结合形成微网。随着如今微网技术的日益完善,将其应用于韧性提升问题仍具有一定研究价值。

此外,已有研究在城市综合能源系统物理层以及信息层的规划中利用大数据以及人工智能等手段,可以使系统具有控制以及灵活运行调度的能力,为了保证研究的全面性,应充分考虑市场方面的相关问题,如市场调节机制的相关问题,在保证系统稳定运行的同时也要保证系统的可靠经济运行。

目前,已有通过加装SOP、加固线路等措施提升系统韧性的方法。通过在系统中加装SOP,实现配网闭环运行,提高其运行稳定性,考虑将其应用于韧性提升问题,可取得较好效果。但是加装SOP的成本较高,在保证系统韧性水平的同时牺牲了经济性。同理,加固线路也面临着大量的改造花费。

综上,当前针对综合能源系统韧性提升策略研究中,尚缺乏以城市综合能源系统为研究对象,考虑系统中多能耦合特性和不同能源负荷品级与优先级,辨识系统薄弱环节,充分考虑城市综合能源系统中多能耦合特性的韧性提升策略与方法。

5 结论与展望

城市综合能源系统作为面向服务用户的关键环节,其对灾害和严重故障应对能力受到了广泛关注。

本文首先介绍了韧性的定义,并综述了城市综合能源系统的韧性分析方法,其次,综述了城市综合能源系统的韧性评估、故障恢复和韧性提升方法。首先综述了城市综合能源系统的特点,并对现有的国内外对于城市综合能源系统韧性评估进行总结;其次,就极端扰动事件下的负荷恢复策略进行综述;最后,对目前存在的电力系统和综合能源系统韧性提升策略进行了详细分析,为后续研究提供参考。

作为未来城市供能重要发展趋势,城市综合能源系统的韧性得到了国内外专家学者的广泛关注,现有研究主要从计及多能源负荷损失的韧性评估和考虑不同故障类型、计及联络开关、检修和分布式电源联合优化的韧性提升策略方面开展研究。但是目前存在的韧性评估和提升方法多数需要进行大量的OPF计算,存在计算量大和效率低等缺点。在未来,随着不同能源系统耦合程度的不断加强,可充分考虑不同能源系统多能耦合特性,并从深度耦合后系统的拓扑结构出发,从系统拓扑角度和元件层面提出城市综合能源系统的高效、快速韧性评估方法,可有效避免冗余复杂的计算,并能快速判别系统薄弱环节,进而探究面向韧性提升的城市综合能源系统协调运行策略,可提升城市综合能源系统供能的韧性与安全性,在一定程度上促进分布式可再生能源消纳,提高城市综合能源系统抵御极端灾害和连锁性故障的能力,对于城市能源网络的规划、运行具有重要意义,也将是未来相关研究的重点与热点之一。

参考文献

- [1] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13(in Chinese).
- [2] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170.
ZHOU Xiaoxin, ZENG Rong, GAO Feng, et al. Development status and prospects of the Energy Internet[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(2): 149-170(in Chinese).
- [3] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2951.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2951(in Chinese).

- [4] 曹军威, 王继业, 明阳阳, 等. 软件定义的能源互联网信息通信技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3649-3655.
CAO Junwei, WANG Jiye, MING Yangyang, et al. Software-defined information and communication technology for energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3649-3655(in Chinese).
- [5] 卢志刚, 刘浩然, 何良策. 计及时段粒化的电-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 266-276.
LU Zhigang, LIU Haoran, HE Liangce. Low-carbon economic dispatch of integrated electricity and natural gas systems considering period granulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 266-276(in Chinese).
- [6] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3023-3034.
LIU Dichen, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy Internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3023-3034(in Chinese).
- [7] 林卫斌, 苏剑. 理解供给侧改革: 能源视角[J]. 价格理论与实践, 2015(12): 8-11.
- [8] 田园园, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 面向综合能源供给侧改革的城市配网规划方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2924-2934.
TIAN Yuanyuan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Planning of urban distribution network considering the integrated energy supply-side reform[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2924-2934(in Chinese).
- [9] 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).
- [10] WANG Y Z, CHEN C, WANG J H, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [11] Industrial Control Systems Cyber Emergency Response Team (ICS-CERT), U.S. Department of Homeland Security. Cyber-attack against Ukrainian critical infrastructure[EB/OL]. (2016-02-25)[2020-11-20]. <https://ics-cert.us-cert.gov/alerts/IR-ALERT-H-16-056-01>.
- [12] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in south Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6(in Chinese).
- [13] 易俊, 卜广全, 郭强, 等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 1-6.
YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Brazilian power grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-6(in Chinese).
- [14] BBC News. New York power cut: supply restored in Manhattan[N/OL]. <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-48978692>.
- [15] Zobel C W. Comparative visualization of predicted disaster resilience[C]//7th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management. Seattle, USA, 2010.
- [16] Carpani J, Shipman A, O'Neill K, Roberts L, Torrance J. Major power cut across country as London goes dark after National Grid failure[N/OL]. (2019-08-09). <https://www.telegraph.co.uk/news/2019/08/09/major-power-cut-across-country-london-goes-dark-national-grid/>.
- [17] Liu C C. Distribution systems: reliable but not resilient[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 93-96.
- [18] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [19] CUTTER S L, BARNES L, BERRY M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 598-606.
- [20] ZHONG S, CLARK M, HOU X Y, et al. Development of hospital disaster resilience: conceptual framework and potential measurement[J]. Emergency Medicine Journal, 2014, 31(11): 930-938.
- [21] LI Y, LENCE B J. Estimating resilience for water resources systems[J]. Water Resources Research, 2007, 43(7): W07422.
- [22] IEEE PES Industry Technical Support Task Force: ‘The definition and quantification of resilience’. IEEE, 2018.
- [23] HUSSAIN A, BUI V H, KIM H M. A proactive and survivability-constrained operation strategy for enhancing resilience of microgrids using energy storage system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 75495-75507.
- [24] 周贤正. 城市综合能源系统配电-气-热网联合规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [25] WANG D, WANG C S, LEI Y, et al. Prospects for key technologies of new-type urban integrated energy system[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 403-413.
- [26] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24(in Chinese).
- [27] 董帅, 王成福, 徐士杰, 等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 12-19.
DONG Shuai, WANG Chengfu, XU Shijie, et al. Day-ahead

- optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 12-19(in Chinese).
- [28] LI Z G, WU W C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 12-22.
- [29] LI Z G, WU W C, WANG J H, et al. Transmission-constrained unit commitment considering combined electricity and district heating networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 480-492.
- [30] LIN C H, WU W C, ZHANG B M, et al. Decentralized solution for combined heat and power dispatch through benders decomposition[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1361-1372.
- [31] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. *Applied Energy*, 2017, 199: 234-246.
- [32] 李平, 王海霞, 王漪, 等. 利用建筑物与热网热动态特性提高热电联产机组调峰能力[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(15): 26-33.
- LI Ping, WANG Haixia, WANG Yi, et al. Improvement of peak load regulation capacity of combined heat and power units considering dynamic thermal performance of buildings and district heating pipelines network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(15): 26-33(in Chinese).
- [33] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J H. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. *Chaos (Woodbury, N Y)*, 2011, 21(2): 025102.
- [34] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 3347-3355.
- [35] FANG J K, ZENG Q, AI X M, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 188-198.
- [36] 葛少云, 刘静仪, 刘洪, 等. 需求响应机制下含建筑虚拟储能的能源站经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(4): 35-43.
- GE Shaoyun, LIU Jingyi, LIU Hong, et al. Economic dispatch of energy station with building virtual energy storage in demand response mechanism[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(4): 35-43(in Chinese).
- [37] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 581-591.
- JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 581-591(in Chinese).
- [38] JIN X L, MU Y F, JIA H J, et al. Dynamic economic dispatch of a hybrid energy microgrid considering building based virtual energy storage system[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 386-398.
- [39] 陈厚合, 李泽宁, 靳小龙, 等. 集成智能楼宇的主动配电网建模及优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(22): 6550-6563.
- CHEN Houhe, LI Zening, JIN Xiaolong, et al. Modeling and optimization of active distribution network with integrated smart buildings[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(22): 6550-6563(in Chinese).
- [40] LIU W L, LIU C L, LIN Y J, et al. Optimal scheduling of residential microgrids considering virtual energy storage system[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 942.
- [41] HUANG G, WANG J H, CHEN C, et al. Cyber-constrained optimal power flow model for smart grid resilience enhancement[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5547-5555.
- [42] HUANG G, WANG J H, CHEN C, et al. Cyber-constrained optimal power flow model for smart grid resilience enhancement[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5547-5555.
- [43] 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(in Chinese).
- [44] 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.
- [45] HENRY D, EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ J. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 99: 114-122.
- [46] ALBASRAWI M N, JARUS N, JOSHI K A, et al. Analysis of reliability and resilience for smart grids[C]//2014 IEEE 38th Annual Computer Software and Applications Conference. July 21-25, 2014, Vasteras, Sweden. IEEE, 2014: 529-534.
- [47] 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).
- [48] PANTELI M, MANCARELLA P, WILKINSON S, et al. Assessment of the resilience of transmission networks to extreme wind events[C]//2015 IEEE Eindhoven PowerTech. June 29-

- July 2, 2015, Eindhoven, Netherlands. IEEE, 2015: 1-6.
- [49] KAHAN J H, ALLEN A C, GEORGE J K. An operational framework for resilience[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2009, 6(1): DOI:10.2202/1547-7355.1675.
- [50] 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).
- [51] 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(in Chinese).
- [52] 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).
- [53] 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.
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(in Chinese).
- [54] MIN O Y, DUEÑAS-OSORIO L, XING M. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36/37: 23-31.
- [55] 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(in Chinese).
- [56] 茅逸斐. 智能配电网的供电恢复策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [57] NAHMAN J, ŠTRBAC G. A new algorithm for service restoration in large-scale urban distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 1994, 29(3): 181-192.
- [58] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54(in Chinese).
- [59] DIMITRIJEVIC S, RAJAKOVIC N. Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1227-1232.
- [60] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55.
ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55(in Chinese).
- [61] 冯雪平, 梁英, 郭炳庆. 基于图论的含分布式电源配电网供电恢复动态规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 24-29.
FENG Xueping, LIANG Ying, GUO Bingqing. A dynamic programming method based on graph theory for restoration of distribution system with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 24-29(in Chinese).
- [62] 赵晶晶, 杨秀, 符杨. 考虑分布式发电孤岛运行方式的智能配电网供电恢复策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 45-49.
ZHAO Jingjing, YANG Xiu, FU Yang. Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 45-49(in Chinese).
- [63] 黄弦超, 杨雨, 范闻博. 配电网多故障抢修与供电恢复联合优化模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 68-73.
HUANG Xianchao, YANG Yu, FAN Wenbo. Combined optimization model for maintenance scheduling and service restoration of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 68-73(in Chinese).
- [64] FUKUYAMA Y. Reactive tabu search for distribution load transfer operation[C]//2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077). January 23-27, 2000, Singapore. IEEE, 2000: 1301-1306.
- [65] 吴建中, 余贻鑫. 一种高效的配电网供电恢复算法[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 82-86.
WU Jianzhong, YU Yixin. An efficient algorithm for distribution network service restoration[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 82-86(in Chinese).
- [66] 徐玉琴, 李雪冬, 张丽. 基于多智能体免疫算法的配电网供电恢复[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 15-19.
XU Yuqin, LI Xuedong, ZHANG Li. Application of multi-agent immune algorithm for distribution service restoration[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2010, 37(2): 15-19(in Chinese).
- [67] 赵冬梅, 郑朝明, 高曙. 配电网的供电优化恢复策略[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 67-71.
ZHAO Dongmei, ZHENG Zhaoming, GAO Shu. Optimal service restoration strategy of distribution network[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 67-71(in Chinese).
- [68] 于文鹏, 刘东, 翁嘉明. 含分布式电源的配电网供电恢复模型及改进贪婪算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 23-30.

- YU Wenpeng, LIU Dong, WENG Jiaming. A power restoring model for distribution network containing distributed generators and improved greedy algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(24): 23-30(in Chinese).
- [69] 冯杰, 陈骏宇, 陈明军, 等. 基于图论的含分布式电源配电网故障恢复算法[J]. *中国电力*, 2015, 48(6): 63-71.
FENG Jie, CHEN Junyu, CHEN Mingjun, et al. Research on graph theory-based service restoration algorithm of distribution network containing distributed generation[J]. *Electric Power*, 2015, 48(6): 63-71(in Chinese).
- [70] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(2): 56-62(in Chinese).
- [71] DING T, LIN Y L, LI G F, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 4145-4147.
- [72] 茅逸斐, 韩蓓, 李国杰, 等. 基于网络等效的配电网快速供电恢复策略并行化实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 99-108.
MAO Yifei, HAN Bei, LI Guojie, et al. Parallel realization of fast restoration strategy for distribution system based on network equivalence[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 99-108(in Chinese).
- [73] YAO S H, ZHAO T Y, WANG P, et al. Resilience-oriented distribution system reconfiguration for service restoration considering distributed generations[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA. IEEE, 2017: 1-5.
- [74] 张利军, 孙轶恺, 茅逸斐, 等. 基于智能软开关的配电网供电恢复联合优化策略[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(11): 180-184.
ZHANG Lijun, SUN Yikai, MAO Yifei, et al. Joint optimization strategy for power restoration of distribution network based on soft open point[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(11): 180-184(in Chinese).
- [75] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4390-4398.
SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4390-4398(in Chinese).
- [76] 杨丽君, 安立明, 杨博, 等. 基于可达性分析的主动配电网多故障分区修复策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(20): 4864-4875.
YANG Lijun, AN Liming, YANG Bo, et al. Multi-fault partition repair strategy of active distribution network based on reachability analysis[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(20): 4864-4875(in Chinese).
- [77] 陈玮, 周贤正, 李晏君, 等. 考虑电动汽车配置的主动配电网鲁棒孤岛恢复[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(增刊1): 58-67.
CHEN Wei, ZHOU Xianzheng, LI Yanjun, et al. A robust islanding restoration policy for active distribution network considering optimal allocation of emergency electric vehicles[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(S1): 58-67(in Chinese).
- [78] 陈玮, 丁筱, 施云辉, 等. 考虑双向耦合的电-气综合能源系统时序故障恢复方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 86-94.
CHEN Wei, DING Xiao, SHI Yunhui, et al. Sequential fault restoration method for electricity-gas integrated energy system considering two-way coupling[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 86-94(in Chinese).
- [79] 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.
- [80] MA S S, CHEN B K, WANG Z Y. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [81] LEI S B, WANG J H, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2030-2041.
- [82] ABEL HAFEZ A, OMRAN W A, HEGAZY Y G. A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 1911-1919.
- [83] WANG Y, XU Y, HE J H, 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.
- [84] CHEN C, WANG J H, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 958-966.
- [85] MOUSAVIZADEH S, HAGHIFAM M R, SHARIATKHAH M H. A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 443-460.
- [86] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1780-1787.
- [87] CHATZIVASILADIS S J, HATZIARGYRIOU N D, DIMEAS A L. Development of an agent based intelligent control system for microgrids[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA. IEEE, 2008: 1-6.
- [88] 李春风. 基于Multi-Agent的智能配电网自愈系统研究[D]. 湘

潭: 湖南科技大学, 2012.

- [89] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2869-2879.
- [90] ARIF A, WANG Z Y. Networked microgrids for service restoration in resilient distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(14): 3612-3619.
- [91] XU Y, 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.
- [92] PASHAJAVID E, SHAHNIA F, GHOSH A. Development of a self-healing strategy to enhance the overloading resilience of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 868-880.
- [93] CHEN M F, NING G T, YU Y, et al. Research on application of integrated energy planning for island[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). November 26-28, 2017, Beijing. IEEE, 2017: 1-5.
- [94] YAN M Y, HE Y B, SHAHIDEHPOUR M, et al. Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4881-4892.
- [95] MANSHADI S D, KHODAYAR M E. Resilient operation of multiple energy carrier microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2283-2292.
- [96] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Robust defense strategy for gas-electric systems against malicious attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2953-2965.
- [97] CONG H, HE Y, WANG X, et al. Robust optimization for improving resilience of integrated energy systems with electricity and natural gas infrastructures[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 1066-1078.
- [98] HE C, DAI C X, WU L, et al. Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5787-5798.
- [99] LI X Y, ZHANG J J, SU H, et al. Resilience assessment of China's natural gas supply system based on ecological network analysis[C]//2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRs). November 20-22, 2019, Rome, Italy. IEEE, 2019: 402-406.
- [100] HAUSER P, HOBBIE H, MÖST D. Resilience in the German natural gas network: Modelling approach for a high-resolution natural gas system[C]//2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). June 6-9, 2017, Dresden. IEEE, 2017: 1-6.
- [101] LI Y, LI Z Y, WEN F S, et al. Minimax-regret robust Co-optimization for enhancing the resilience of integrated power distribution and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 61-71.
- [102] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated electricity-heat-gas network modelling for the evaluation of system resilience to extreme weather[C]//2017 IEEE Manchester PowerTech. June 18-22, 2017, Manchester. IEEE, 2017: 1-6.
- [103] LV C, YU H, LI P, et al. Coordinated operation and planning of integrated electricity and gas community energy system with enhanced operational resilience[J]. IEEE Access, 2020, 8: 59257-59277.
- [104] BALASUBRAMANIAM K, SARAF P, HADIDI R, et al. Energy management system for enhanced resiliency of microgrids during islanded operation[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 137: 133-141.
- [105] 吴熙, 唐子逸, 徐青山, 等. 基于Q学习算法的综合能源系统韧性提升方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 146-152.
- WU Xi, TANG Ziyi, XU Qingshan, et al. Q-learning algorithm based method for enhancing resiliency of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 146-152(in Chinese).
- [106] 杨丽君, 王晨, 赵优, 等. 基于双层优化模型的电-气耦合综合能源故障恢复策略[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4264-4273.
- YANG Lijun, WANG Chen, ZHAO You, et al. Electric-gas coupled integrated energy fault recovery strategy based on Bi-level optimization model[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4264-4273(in Chinese).
- [107] 管霖, 陈鹏, 唐宗顺, 等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2934-2943.
- GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2943(in Chinese).

收稿日期: 2021-01-07; 修回日期: 2021-02-13。



张儒峰

作者简介:

张儒峰(1990), 男, 博士, 讲师, 研究方向为综合能源系统建模、分析与优化运行、电力系统优化运行。通信作者, E-mail: zhangrufeng@neepu.edu.cn。

李雪(1986), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、电力系统高性能计算、电力市场, E-mail: xli@neepu.edu.cn;

姜涛(1983), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全性和稳定性、可再生能源集成、综合能源系统, E-mail: t.jiang@aliyun.com。

陈厚合(1978), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统安全性和稳定性, E-mail: chenhouhe@126.com。

(责任编辑 张鹏)