

CPSS视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行:研究述评与展望

宋 梦¹, 周佳妮¹, 高赐威¹, 晏鸣宇², 李 懋³

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074;

3. 国家电网国际发展有限公司, 北京市 100031)

摘要:“韧性”是城市应对自然灾害、提高风险防控能力的重要属性。频发的大停电事故会造成严重的经济和民生损失,阻碍城市发展甚至威胁国家能源安全,“韧性配电网”是“韧性城市”的必然要求与基本保障。高比例建筑负荷是城市配电网的主要特征,恢复供电后的建筑负荷行为异于常态,不仅对电力供应提出了更高的要求,而且给予配电网韧性以提升潜力。城市建筑作为用户与电力系统、电力市场、大数据等深度交互的主要场所之一,其与配电网的协调运行是一个复杂的信息-物理-社会系统(CPSS)。首先,文中重点关注城市配电网负荷恢复阶段,总结了当前城市建筑与配电网高韧性协调运行在物理、社会、信息维度面临的问题;然后,分别对极端条件下城市建筑与配电网的耦合机理和建模(物理维度)、城市建筑产消者行为刻画与激励机制设计(社会维度)、配电网灾后态势感知与数据共享(信息维度)三方面的研究现状进行了述评;最后,总结了CPSS视角下城市建筑与配电网高韧性耦合运行研究所面临的四重挑战,并对未来的研究路径进行了展望。

关键词: 信息-物理-社会系统(CPSS); 城市建筑; 配电网; 韧性

0 引言

自2002年倡导地区可持续发展理事会在联合国可持续发展全球峰会上将“韧性”的概念引入城市建设领域以来,“韧性”已成为城市建设与治理的一个重要衡量指标。2012年,联合国国际减灾战略署发布《造就韧性城市报告》后,中国积极参与“让城市更具韧性计划”^[1]。2020年11月3日,十九届五中全会审议通过《中共中央关于制定国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》,首次明确提出在国内建设“韧性城市”以应对自然灾害,提高城市治理的风险防控能力^[2]。

电力是支撑城市发展的生命线之一,安全稳定的电力系统是维持现代社会正常运行的必要条件。近年来,由自然灾害、网络攻击、人为操作失误等事件引起的大停电事故屡次发生,造成了严重的经济与民生损失,甚至对国家能源安全产生威胁。例如,2021年中国河南省发生特大暴雨,致使郑州范围内60余条高压线路不同程度受损^[3];2019年英国电网因雷击引起线路停运,并诱发了一系列连锁故障^[4];

2008年中国南方地区发生百年一遇的冰灾,近200个县市停电,经济损失高达104.5亿元^[5]。作为连接电力系统与用户的桥梁,配电网对电能质量与供电服务的优劣程度有着重要影响,其独有的脆弱性也成为限制“韧性城市”发展的障碍:与输电网相比,配电网的自动化水平低、控制保护手段相对匮乏,对极端事件的响应能力较弱。据统计,电力系统超85%的故障为配电网故障^[6]。因此,构建“韧性配电网”是建设“韧性城市”的必然要求与重要保障。

城市建筑用能在城市总能耗中的占比高达47%^[7],是城市配电网的主要特征之一;医疗机构、大型公共场所、电力调度中心以及城市一类高层建筑等一级负荷均属于城市建筑范畴,在配电网恢复过程中需要被优先考虑。一方面,城市建筑是多种负荷的载体,如照明负荷、温控负荷(thermostatically controlled load, TCL)、电动汽车(electric vehicle, EV)充电桩等^[8-10],极端情况下,城市建筑负荷的用能行为与配电网高度耦合,呈现多样、复杂、时变的特性,深刻影响配电网负荷恢复进程。另一方面,随着分布式可再生能源的发展与能源领域碳减排的要求,屋顶光伏与储能技术在城市建筑中得到应用,使城市建筑从单纯的电力消费者向电力产消者转变。2021年,国务院在印发的

收稿日期: 2023-07-20; 修回日期: 2023-10-17。

上网日期: 2023-11-03。

国家自然科学基金资助项目(52277085)。

《2030年前碳达峰行动方案》中,明确提出建设集光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的“光储直柔”建筑,推广光伏与建筑一体化应用^[11];同年,国家能源局公布了整县(市、区)屋顶光伏开发试点名单,并鼓励屋顶光伏参与分布式市场交易^[12]。此外,城市建筑中的应急发电机组也能够极端情况下输送电能,缓解配电网供电压力。综上所述,极端条件下城市建筑不仅是配电网主要恢复对象,其潜在的柔性调节能力与发电能力也可以加速配电网自愈进程,对城市配电网韧性提升起着至关重要的作用。

随着物联网技术的发展,城市建筑于配电网的意义不再局限于负荷层面。作为用户与电力系统、电力市场、大数据等深度交互的主要场所之一,韧性背景下的建筑负荷与配电网耦合协调运行构成了信息-物理-社会系统(cyber-physical-social system, CPSS)^[13]:人与周围环境的交互直接影响了用电设备(如空调、热水器)能耗,塑造了建筑功率曲线;电力市场的发展,尤其是可交易能源市场^[14]的提出,使得小用户可以直接与其他用户进行交易,进一步拓展了电力系统社会域的市场模式和参与主体;智能终端的普及使得电力系统信息域的覆盖面和功能质量进一步升级,建筑用能数据采集、存储与处理更为便捷。只考虑单一物理维度的配电网优化运行无法全面深度感知城市建筑行为并充分激发其柔性调节潜力,严重压缩了城市配电网韧性提升空间,难以满足未来城市对高韧性的要求。

因此,本文聚焦配电网灾后恢复阶段,首先,梳理了极端情况下城市建筑与配电网耦合运行的特点及其高韧性协调运行过程中存在的关键问题。其次,基于以上归纳分析,分别从物理、社会、信息3个维度对城市建筑与配电网高韧性协调运行的研究现状进行了述评:1)物理维度,从研究对象与求解算法两方面对现有城市配电网负荷恢复方法进行了综述;2)社会维度,聚焦于城市建筑产消者的行为多样性分析与面向配电网韧性提升的激励机制设计,对比了需求响应与可交易能源市场之间的差异,指

出了可交易能源市场驱动的配电网负荷恢复策略的研究前景;3)信息维度,述评了极端情况下城市建筑与配电网协调互动的态势感知与数据共享方法。最后,本文聚焦可交易能源市场、联邦学习等技术方法,提出了CPSS视角下与城市建筑耦合协调运行的配电网韧性提升研究路径,以“韧性配电网”的发展助力“韧性城市”的建设。

1 极端条件下城市建筑与配电网协调运行特点及问题描述

1.1 电力系统韧性概念

“韧性(resilience)”一词最早由加拿大生物学家Holling提出,用于评价生态系统在受干扰情况下维持原有状态的能力^[15]。在全球范围内大停电事故频发的背景下,“韧性”的概念逐步被引入电力系统领域,用以衡量系统抵御、适应极端事件并在灾后快速恢复的能力^[16]。发展至今,不同地区和研究机构针对“电力系统韧性”定义提出了不同标准^[17-18],其说法虽各有不同,但对一个韧性电力系统所提出的核心要求均可概括至两个方面:一是应对小概率大规模极端事件的抵抗能力;二是事后的恢复能力。电力系统在极端事件发生过程中的性能曲线如图1^[19-20]所示,可概括为准备与预防、抵御、响应与适应、恢复4个阶段,直观反映了系统应对极端事件的过程与系统的韧性水平。核心要求具体如表1所示。

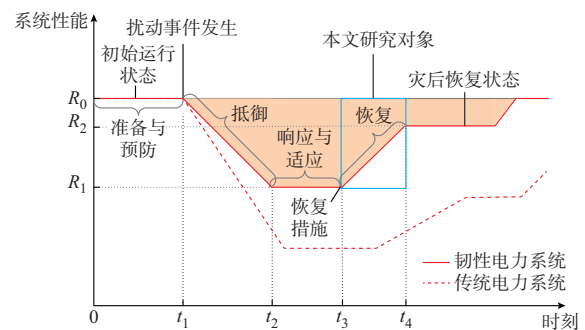


图1 极端事件下的电力系统性能曲线
Fig. 1 Power system performance curves under extreme events

表1 韧性电力系统的核心要求
Table 1 Core requirements for a resilient power system

要求	抵抗能力	恢复能力
对象	小概率、大规模极端事件	小概率、大规模极端事件
目标	提升系统灾中生存、智能分析决策能力 ^[21]	提升系统灾后应急处置、快速恢复能力
具体措施	安全监测、风险决策、需求侧管理等	应急抢修、网络重构、多能互补等
物理层问题	极端事件冲击下的强扰动与不确定性因素	灾后负荷行为与电网恢复进程高度耦合
信息层问题	系统在线状态感知	数据孤岛;系统灾后故障感知
社会层问题	用户行为精准刻画与建模	用户行为精准刻画与建模

图1中,横坐标表示时刻,用于表征极端事件进程,纵坐标表示系统性能,一般用功能函数表示,具体可等效为关键负荷的功率或收益。以图中韧性电力系统为例,在极端事件发生时刻(t_1)之前,电力系统处于安全稳定运行阶段,所有负荷均能获得稳定供电,系统性能维持在一个较高的水平 R_0 ; t_1 时刻后,系统将采取一系列保护控制措施,部分负荷失电,系统性能迅速下降为 R_1 ,并持续至 t_3 ;随后,系统开始采取恢复措施对失电负荷进行供电,系统性能逐渐上升,直至 t_4 时刻上升至 R_2 。恢复措施结束后, R_2 可能仍小于 R_0 ,这是由于极端事件会损坏系统中的某些设备,使其需要较长时间进行维修或替换,无法及时在恢复过程中使用。当受损设备被修复时,系统性能便逐渐恢复至原始状态 R_0 。电力系统的韧性可以由图1中阴影部分的面积量化表示,提升系统韧性也就是减小图1中的阴影面积。长时间大规模的停电事故将对城市造成严重的经济损失与消极的社会影响,且当前大规模新能源并网与电力电子设备的接入使得电力系统的复杂程度大规模提升,极端事件对电力系统的冲击更大、系统发生大停电事故的概率更高。因此,作为评价配电网韧性的关键维度,本文重点关注极端事件下城市配电网的灾后恢复能力。

1.2 极端情况下城市建筑与配电网耦合特点及问题描述

1.2.1 耦合特点

城市配电网韧性提升需要建立在对城市建筑负荷特性的深刻理解上。城市建筑是多种负荷的载体,不仅包含常规的刚性负荷,而且聚集了TCL、EV充电桩等柔性负荷,具有较大功率调节空间,深刻影响配电网恢复进程。极端情况下的城市建筑负荷总体行为可由图2(a)表示。图中: t_c 、 t_r 、 t_f 分别为电力中断、电力恢复与负荷恢复完全柔性调节能力的时刻。该过程中城市建筑负荷的具体运行特性可概括为:

1)冷负荷回流(时变性):城市建筑负荷在恢复供电后具有冷负荷回流(cold load pickup, CLPU)现象^[22],使负荷功率曲线较正常运行状态发生偏移。CLPU现象主要由城市建筑中TCL运行状态多样性缺失导致。如图3所示,配电网发生故障后,TCL的运行状态会经历电力中断、电力恢复与运行状态多样性恢复3个阶段^[23]。图中:红色与蓝色圆点分别代表TCL的关断(OFF)与开通(ON)状态; T_{min} 和 T_{max} 分别为事先设定的TCL内部温度下限和上限,内部温度高于 T_{max} 时TCL开启,低于 T_{min} 时TCL关断(以夏天TCL制冷为例); T_{out} 为室外温度。

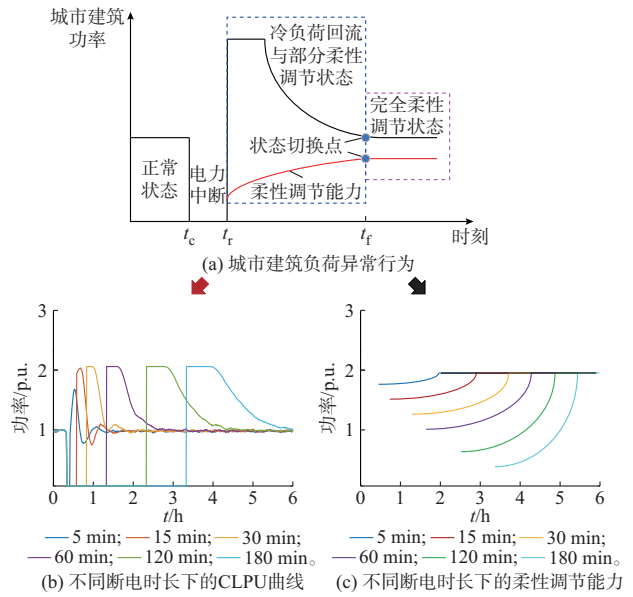


图2 极端情况下城市建筑异于常态的负荷行为
Fig. 2 Abnormal load behavior of urban buildings in extreme cases

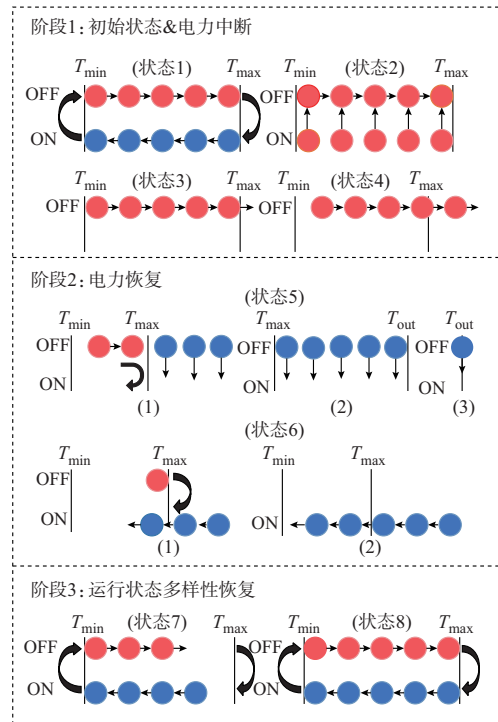


图3 城市建筑CLPU状态演化机理图
Fig. 3 Evolution mechanism diagram of CLPU state of urban building

配电网正常运行时,TCL的开关状态和温度均匀分布,TCL集群功率较为平稳(状态1);发生断事故后,TCL的电力供应中断,其开关状态全部切换至OFF,运行状态多样性受到破坏,TCL的集群功率瞬间下降到0(状态2),内部温度开始升高(状

态3),并逐渐高于 T_{max} (状态4)。当电力供应恢复时,由于TCL内部温度偏离初始设定温度,大量TCL同时切换至ON状态,以使内部温度恢复到初始设定值,TCL集群功率瞬间达到峰值并逐步恢复初始循环状态(状态5、6)。然后,随着TCL运行状态多样性的恢复,其功率值逐渐趋近于稳态值(状态7、8)。因此,TCL集群功率在配电网负荷恢复过程中随时间变化而变化(见图2(b)),具有时变性。电力恢复供应瞬间,TCL集群功率剧变需要更多的电力支撑,而在配电网恢复初期,系统中的电力供应较为紧张。负荷对电力的高需求与电力供应的紧缺使得配电网负荷恢复的能力被大大削减。

2)多种状态并存与切换(多样性):城市建筑柔性负荷(见图4)在供电恢复过程中通过改变自身用电模式进行能量转换与存储,为配电网提供柔性调节能力。以EV充电桩为例,作为EV集群的聚合控制器,随着车网互动(vehicle to grid, V2G)技术的发展, EV充电桩的储能潜力被进一步挖掘并作为虚拟储能单元参与并网,有望在极端情况下向电网返送电能,维持电网电压与频率稳定、缓解供电压力^[24-25];在合适的调度策略下,充电桩还能与EV资源协调互动,充分发挥EV移动储能的优势,实现灾后电能资源的优化分配,促进关键负荷的恢复^[26-27]。然而,充电桩的灾后可调功率与可调容量范围与EV分布情况密切相关,并受限于用户的出行需求与经济追求。此外,在EV数量激增的背景下,供电恢复初期EV可能出现的大规模随机性充电行为也将经充电桩反馈给电网,对电网稳定运行造成影响。

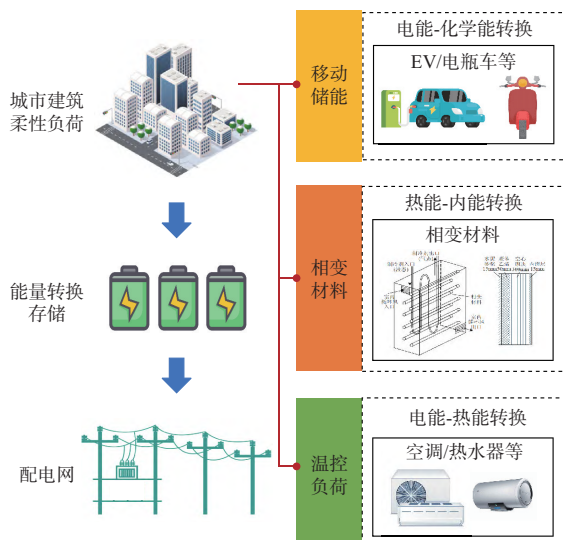


图4 城市建筑内部资源示意图
Fig. 4 Schematic diagram of internal resources in urban buildings

除EV充电桩的源荷二重特性外,城市建筑相变材料可通过物理相态变化对热能进行存储与释放,通过一定控制手段与配电网进行友好互动;TCL在CLPU阶段不具备柔性调节功能,但在CLPU结束后也可切换至需求响应状态,逐步恢复柔性调节能力。因此,如图2(c)所示,在配电网供电恢复过程中,城市建筑负荷不仅存在时变性特征,而且具备一定的柔性调节能力,并且这种柔性调节能力随着时间推移逐渐增强。城市建筑负荷这种多状态并存与切换的特点大大增加了配电网负荷有序恢复的难度。

3)断电时长依赖特性(复杂性):如图2(b)、(c)所示,城市建筑的CLPU曲线、柔性调节能力以及状态切换时间点(即图2(c)中曲线与直线的交点)均与断电时长有关,即配电网决策序列决定了城市建筑负荷的行为。图2(b)、(c)中不同颜色的曲线分别代表不同断电时长下负荷功率随时间的变化,如红色曲线代表断电时长为15 min时的城市建筑负荷灾后功率曲线。

以夏天CLPU为例,如图3中状态5所示,当断电时长较短时,TCL内部温度上升程度较小,可以在供电恢复后快速恢复到正常状态,CLPU的功率峰值较低,且功率波动时间较短(状态5(1));而当断电时间较长时,TCL内部温度升高较多(状态5(2),且当断电时间足够长时,如状态5(3)所示,TCL内部温度与室外温度一致),一旦电力恢复,TCL需要更多时间恢复到初始状态,其冲击功率较大且持续时间较长(状态6)。在不同的断电时长下,TCL恢复运行状态多样性的时长也不同(状态7、8),即集群功率恢复到稳定状态的时长不同,这会导致建筑负荷运行状态的切换点和柔性调节能力有较大差异。除TCL外,不同断电时长下EV的初始荷电状态也将产生差异;同时,出于利益追求与出行需求,EV用户的充放电偏好与具体行为也将较正常供电状态发生改变,进一步导致充电桩蕴含的可调功率与容量资源出现时间、空间层面的随机性特征。因此,城市建筑负荷的运行行为与断电时长密切相关,其与配电网恢复进程高度耦合的特点,大大增加了配电网负荷恢复决策的复杂度。

1.2.2 问题描述

城市建筑负荷这种时变、多样和复杂的运行特性,不仅对配电网电力供应提出了更高的要求,也为配电网恢复提供了较大的柔性调节空间。如何精准量化城市建筑负荷时变、多样和复杂的行为特性,厘清城市建筑负荷与配电网恢复进程的深度耦合关

系,是城市配电网韧性提升在物理维度面临的基础性难题。

随着信息技术发展与配电市场进一步开放,城市建筑与配电网协调运行构成了复杂的 CPSS,具体如图 5 所示。CPSS 视角下城市建筑与配电网的高韧性协调运行构成了一种三角关系:物理层为信息层设备正常工作提供电力供应和保障,信息层对物理层进行数据采集与调控;物理层是社会层各种市场主体用能意愿的实际承担者与交互场所,而社会层的用户需求驱动着物理层的电能传输;社会层的各种激励信号通过信息层传导;信息层的通畅为电力市场主体的交易行为提供保证^[13]。

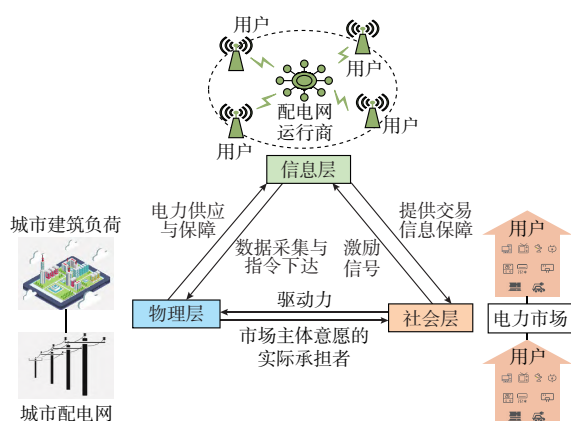


图 5 城市建筑与配电网 CPSS 耦合关系
Fig. 5 Coupling relationship between urban building and distribution network CPSS

在信息、社会与电力系统高度融合的背景下,城市建筑与配电网的高韧性耦合互动协调还存在以下问题。

1) 社会维度:城市建筑屋顶光伏、应急发电机组、储能等设备使其从单纯的电力消费者向产消者身份转变,能够在配电网恢复初期向配电网或其他负荷用户提供一定的电力供应,拓展了极端情况下配电网负荷恢复的实现途径。城市建筑产消者的用电行为对配电网负荷恢复有着重要影响:产消者决策行为常违背“理性经济人”假设原则,而且在主体与时间层面均存在多样性特征,加剧了社会维度建筑用能行为建模的难度。

此外,配电网恢复过程中尚缺乏完善的市场激励机制,极端情况下城市建筑产消者蕴含的资源处于“沉睡”状态,主动调节意愿低、动力不足。在电源侧,新能源发展迅速,对系统柔性调节能力的需求增加,而用户侧由于激励机制的匮乏,大量以城市建筑为载体的用户侧柔性资源潜力有待进一步挖掘,使得配电网恢复过程中面临源荷互动途径匮乏、平衡

能力缩水等问题,供需紧张局势恶化,进一步延缓了配电网恢复进程。因此,亟须探索相关激励机制协调城市建筑与配电网友好互动,合理分配用户侧资源所有权与使用权,加快配电网负荷恢复进程。

2) 信息维度:城市建筑与配电网 CPSS 物理层的问题带来了大量需要双向传递的信息,配电网侧市场化的不断演进则拓展了电力系统社会域的市场模式和参与主体,带来了大量激励信号、控制信号等。以上信息的传播需要依赖城市建筑中配备的大量智能终端,以实现信息域覆盖面和功能质量的升级。供电恢复过程中,上述智能终端需要电力的支撑,但物理域与信息域的深刻交互使得信息通信设备发生故障的概率增大。目前,尚缺乏信息与物理维度协调交互的势态感知手段用以配电网故障分析与恢复。

另一方面,极端情况下城市建筑与配电网互动协调过程中存在“数据孤岛”困境,城市建筑用能、交易等行为无法被全面感知量化,难以实现配电网与城市建筑协调运行。借助于大数据处理和人工智能技术,城市建筑与配电网负荷恢复理论上可以进行深度感知与融合互动,但在经济效用、标准体系、法律法规约束下,城市建筑与配电网之间共享数据存在“不能、不愿、不敢”的困境,“数据孤岛”成为城市建筑与配电网互动协调的障碍。

2 CPSS 视角下城市配电网韧性提升研究现状述评

2.1 极端条件下城市建筑与配电网耦合机理和建模方法(物理维度)

2.1.1 研究对象

当前,配电网负荷恢复策略主要从源-网-储的角度出发,利用分布式电源、网络拓扑柔性变换、实体储能^[28-29]等资源协助配电网恢复。分布式电源是典型的源侧灵活资源,能够辅助或直接实现配电网故障恢复:在配电网馈线可用的情况下,分布式电源能够为所在区域提供直接的额外电能补给,辅助故障恢复^[30-31];而当主供电源与分布式电源不连通时,具有黑启动能力的分布式发电机或应急发电机将以“电气孤岛”状态运行,为孤岛内负荷进行供电^[32]。在此基础上,网侧各类开关与线路维修资源为配电网提供了网络拓扑柔性变换空间,通过网络重构加速负荷恢复^[33];储能设备则能在恢复过程中调用其快速充放电能力,缓解灾后电力供应压力^[34]。

上述策略主要通过增设分布式电源、储能装置等电力设施来提升系统冗余度,因而具有投资成本

高、建设周期长、设备利用率低的缺陷^[35-36]。近年来,利用需求侧资源缓解极端情况下配电网供电压力、构建源-网-荷-储的恢复思路被认为是经济、快速地实现系统恢复的有效途径^[37]。

在众多配电网负荷恢复研究中,用户侧待恢复负荷往往被建模为刚性负荷,其值在供电恢复前后保持不变。文献[38]提出了一种电动公交与网络重构协调优化的配电网负荷恢复方法,将电动公交作为电源,并将待恢复的负荷值设定为固定值;基于线路可控开关和分布式发电资源,文献[39]提出了能够应对多种停电事故的配电网负荷恢复新方法,但其中待恢复的负荷依旧被建模为刚性负荷。然而,城市建筑中大量 TCL 在恢复供电后出现的 CLPU 现象将引起一段时间内的负荷激增,造成负荷恢复缓慢、系统频率稳定性差、系统过负荷甚至二次停电。部分文献考虑了负荷恢复过程中 CLPU 的影响,但将其描述为一种与断电时长无关的固定曲线,与实际情况有较大的出入,影响了模型的普适性^[16]。为此,文献[23]对极端条件下城市建筑的 CLPU 演化机理进行了初步探索,分析了其断电时长依赖特性,论证了供电恢复过程中城市建筑异于常态的运行特性;在此基础上,文献[40]通过算例分析证明了忽略 CLPU 导致的负荷峰值将引发发电机出力越限、线路潮流越限等问题。当前,极端条件下城市建筑负荷的时变、多样与复杂性研究仍属于前瞻性研究,在相关论文中涉及较少。

城市建筑蕴含的多种资源在提升配电网柔性调节能力的同时,也增加了城市建筑与配电网互动协调运行的难度。电力恢复后,城市建筑负荷的用电行为与配电网恢复进程高度耦合,深刻影响着配电网恢复进程。因此,亟需一个简单、低维,同时又能准确刻画城市建筑整体行为的模型对其进行表征^[41-42]。当前,针对城市建筑行为建模的方法主要分为知识驱动型与数据驱动型两种^[43]。其中,知识驱动方法需要研究者高度介入,通过对深层机制与原理的理解来推断研究对象的特点,并结合功能需求,以合适的数学表达式描述变量间的因果关系^[44-45]。然而,知识驱动型的建模方法在实际使用中往往会进行大量条件假设与简化,模型精度较低。为弥补这一缺陷,数据驱动方法摒弃了对研究对象内部机理的严格分析,以大量的试验及测试数据为基础,通过不同的数据处理算法分析数据之间的关联关系,进而生成经验模型。该方法由于需要大量数据进行模型训练,往往存在效率低下的问题。如何有效结合两种建模方法的优势、实现城市建筑负荷行为的精确建模是当前实现配电网韧性提

升的机理与模型基础。

2.1.2 求解算法

当前,配电网负荷恢复模型的求解方法可大致分为基于启发式思想的智能算法与基于最优化思想的数学规划方法两类。智能算法通常将配电网负荷恢复描述为多目标规划问题并对其进行解耦。首先,简化约束条件得出初始可行解;接着,利用潮流校验等方式确定可行解;最后,以合适的算法得出最优解。智能算法包含粒子群优化算法、遗传算法、蚁群算法等,在处理复杂网络问题时表现出了较大的优越性,但由于求解过程包含大量迭代,其求解速度取决于问题规模,且容易陷入局部最优的困境。数学规划方法主要基于凸优化理论,将配电网负荷恢复建模成一个混合整数规划问题,并利用成熟的商业或开源优化求解器求解^[46]。这种方法能够综合考虑负荷恢复的目标函数与各类约束条件,求得全局最优解,但当面对复杂模型,如大规模的混合整数半定规划问题时,其计算负担较大,尚无可有效利用的优化求解器,并面临精确度的挑战^[47]。

部分研究结合智能算法与数学规划算法以求得最优负荷恢复方案。例如,文献[48]结合启发式思想与混合整数规划求解负荷恢复问题,采用启发式算法寻找所有恢复方案,若其中无可行解,则将问题转化为混合整数规划问题进行求解。文献[49]则充分考虑恢复过程中的系统开关操作,提出了综合遗传算法与动态规划的两阶段配电网动态恢复策略。国内外已经在配电网负荷恢复求解算法方面展开了大量研究,基于不同算法的文献及其优缺点如表 2 所示。目前,配电网故障恢复尚缺乏兼顾求解精度和速度的优化求解方法。

表 2 基于不同求解算法的文献分类
Table 2 References classified by different solution methods

求解算法	文献	优缺点
粒子群优化算法	[50-51]	求解速度快,算法简单;易陷入局部最优
遗传算法	[52-53]	全局搜索能力强;易陷入局部最优,时间成本高
蚁群算法	[54-57]	全局搜索效率高,鲁棒性强;收敛时间长,有局部最优问题
禁忌搜索算法	[58-59]	所得解即为最优解或接近最优解 ^[60] ;易陷入局部最优
模拟退火算法	[61]	适用范围广,鲁棒性强;收敛速度慢
数学规划方法	[22], [46], [62-68]	计算所得解为全局最优解,求解精度高;计算负担大

此外,上述求解算法均为集中式的求解算法,在求解过程中需要大量采集和调取用户用电信息,无法有效保护用户隐私与偏好,并且实时性不佳。因此,拉格朗日松弛^[60-70]、交替方向乘法^[71-73]等分布式求解算法开始被应用于配电网负荷恢复问题中^[74],但因用户数量与迭代次数的增多,求解效率仍有待提高。

2.2 面向配电网韧性提升的城市建筑产消者行为刻画与激励机制设计(社会维度)

2.2.1 产消者行为刻画

城市建筑产消者的行为对配电网供电恢复起着至关重要的作用。随着需求侧市场化不断推进,城市建筑产消者具备了参与电力市场运行的能力。极端情况下,这一类产消者有望在外界激励下调用自身资源参与配电网负荷恢复过程,加快配电网负荷恢复进程。

市场环境下,产消者的行为模型通常是在理性人假设下采用效用理论建立^[75-76]:一方面,产消者的行为在经济上呈现逐利性,对市场激励做出相应决策;另一方面,产消者也会考虑自身用电舒适性、便捷性等效用因素,在供电恢复的不同阶段对停电时间的容忍度做出响应。一些研究通过问卷调查与分析,得出了电力用户对停电时间容忍度的非线性特征^[33]。然而,根据行为经济学,市场环境下产消者的响应行为虽然在理论上以自身效用最优为目的,但出于个体能源偏好、用电习惯等的差异,现实中其行为往往是有限理性的,尤其是当面临极端情况时。用户的有限理性行为不仅迫使极端情况下的城市建筑身份在消费者与生产者间不断转换,也令其行为结果出现多样性:同一时段下的产消者可根据行为的区别划分成不同类型,如追求经济利益的生产型、优先满足自身用电的享受型等;而某一类型的产消者也有可能在不同的断电时间尺度下做出不同的发用电决策。

目前,已有部分文献对产消者的有限理性行为进行了研究。文献[71]考虑产消者社交网络的影响,依据产消者的行为特性,将产消者分为发展型、生产型和享受型,建立了考虑不同类型产消者的供需响应模型;文献[77]考虑前景理论中的框架效应对电价不确定情况下产消者的行为进行了建模。文献[78-79]同样对市场环境下考虑有限理性行为的用户决策建模方法进行了初步探索,但配电网故障后,对用户负荷在失电情况下的个体用电决策行为差异及其有限理性特点尚未进行相关研究。

2.2.2 激励机制设计

配电网负荷恢复过程中来自主网的电力供应往往不足;大量可再生能源并网为配电网负荷恢复提供了重要的电源支撑,但其具有的强不确定性和波动性会引起负荷恢复过程中的频率或电压波动问题。因此,配电网需要具备一定的柔性调节能力。

需求响应是目前常用的一种调用用户侧资源柔性调节能力的手段,可分为电价型和激励型两种。配电网负荷恢复过程中,电网供电严重不足,分时电价、尖峰电价等电价机制往往难以发挥其作用甚至失效,用户侧用能曲线无法根据系统需求进行有效重塑。为调动用户侧资源实现负荷的快速有效恢复,美国PJM市场采用以直接负荷控制手段为代表的紧急需求响应对用户负荷进行调控,激励用户对极端情况做出响应^[80]。在此基础上,部分文献展开了对直接负荷控制方式的研究:文献[81]基于分布式资源运行特性,通过直接控制手段,在系统故障时直接将配电网重构为多个自给型微网;文献[82]建立了以最小化微网负荷恢复时间与最大化负荷恢复量为目标的负荷恢复模型。然而,直接负荷控制方法属于自上而下的控制^[83]:一方面,用户侧资源实时信息无法被及时获取,致使其柔性调节潜力难以被充分挖掘;另一方面,这种侵入式的控制容易造成信息泄露问题,降低了用户主动参与配电网运行的意愿和积极性。

美国太平洋西北国家实验室于2019年率先提出利用可交易能源市场提升配电网韧性^[84]。可交易能源市场被定义为“一种基于价值手段的,有助于实现全系统动态供需平衡的市场机制或控制方法”^[14,85],这一概念的提出使配电网层面的市场运行成为可能:用户可以根据需求形成的价值信号,充分挖掘自身的调控能力和弹性,在获取期望的效益下主动参与配电网的优化运行。

需求响应与可交易能源市场的对比如表3所示。相对于传统的需求响应,可交易能源市场在调动用户积极性、尊重用户意愿方面均存在较大优势^[86-87],有望充分激励用户主动参与配电网负荷恢复进程,提供柔性调节能力^[88]。目前,可交易能源市场是国内外的一大研究热点。美国太平洋西北智能电网基于区位边际价格在5个州建立了包含6万个用户的可交易能源市场,实现了配电网电力供需的实时平衡^[89];中国深圳市蛇口工业区也进行了基于区块链技术的绿色电力虚拟交易试验,成功组织100名社区志愿者完成了电力点对点交易^[90]。此外,德国、菲律宾以及部分欧盟国家等都进行了可交

易能源市场试点应用或实验,以实现配电网实时供需平衡、降低能源成本、促进可再生能源消纳^[91-93]。

表3 需求响应与可交易能源市场的对比
Table 3 Comparison between demand response and tradable energy market

激励类型	需求响应	可交易能源市场
参与者	柔性负荷	产消者
控制方式	基于价格;直接负荷控制	交易驱动
运行模式	自上而下	自下而上
通信方式	单向	双向互动
主动性	较差	较好
隐私性	基于价格型较好,直接负荷控制较差	较好

少数文献已将可交易能源应用于配电网韧性提升研究中。文献[84]提出一种全新的可交易能源系统框架来激励分布式能源资源提供无功功率,以支撑配电网的自愈功能;文献[94]引入嵌套的可交易能源框架概念,将每个虚拟微网都作为一个市场,以促进可交易能源市场与配电网负荷恢复的融合运行。尽管如此,可交易能源市场驱动的配电网韧性提升研究尚处于起步阶段。目前,主流电力市场机制研究仍以正常运行情况下的规则为主,针对极端情况下的市场机制改进措施考虑不足,用户参与市场的全过程机理分析和量化也有待进一步研究。当前,国内尚未出现利用可交易能源市场提升配电网韧性的相关研究报道。

与常规供电状态下的电力市场交易相比,紧急状态下的可交易能源市场需要强调交易过程的快速与高效,因此,需要对常规市场机制进行改进。美国PJM市场中的紧急需求响应通过事前注册、竞价、签订合同以及事后结算完成极端事件中对用户侧资源的调度^[80]。相应地,可交易能源市场或可通过提前注册、签约实现紧急状态下的及时响应,缩短市场启动时间;此外,考虑到城市建筑与配电网的物理耦合,用户可能需要上报不同断电时长下的基准功率曲线集,最终采用与配电网负荷恢复联合优化的市场出清方式,以价格信号引导用户释放柔性调节能力,促进负荷快速恢复。基于以上考虑,可交易能源市场有望充分调动用户侧柔性资源,实现可再生能源的有效消纳,协助配电网安全有效地完成灾后恢复。同时,在城市建筑从消费者向产消者身份转变的进程下,其所包含的屋顶光伏等发电资源能够通过适当的市场机制作为电力供应者参与市场交易、实现供需匹配,为配电网负荷恢复提供更多电力支撑,通过优先对关键负荷供电进一步提升配电网韧性。

2.3 城市建筑与配电网信息交互(信息维度)

城市建筑与配电网 CPSS 物理和社会的维度问题为其带来了大量需要双向交互的信息,城市建筑包含的大量智能终端设备为信息通信与交换提供了可靠途径。在配电网韧性提升背景下,CPSS 信息层的主要功能包括系统态势感知、信息共享与处理两方面。

2.3.1 系统态势感知

配电网的态势感知可以定义为通过采集与分析影响配电网运行状态的各类因素,全面理解电力系统的安全状态,掌握其运行规律,并结合历史数据预测配电网未来运行轨迹^[95-96]。当配电网面临极端事件时,系统恢复策略的制定与配电网当前运行状态密切相关,因此,态势感知的应用可被拓展至配电网灾后恢复,对配电网故障进行定位与识别^[97],其准确性与可靠性对配电网的快速、有效恢复起着至关重要的作用。在配电网故障感知过程中,往往需要借助大量的气象数据^[98]、量测数据^[99-100]、用户侧反馈数据^[101]等提升其感知能力。文献[102]综合考虑气象、地理、社会资源等因素,改进了冰灾环境下的配电网综合态势感知框架;文献[103]充分考虑极端天气下分布式能源对负荷供电的支撑作用,提出了基于态势感知技术的重点区域负荷供电保障策略。以上文献虽然对灾后配电网系统态势感知技术进行了有效探索,但尚未考虑物理层与信息层耦合情况下的协同态势感知。

CPSS 视角下,城市建筑与城市配电网的信息交互主要依赖于智能终端,但物理、信息层的深刻交互导致 CPSS 物理、信息维度故障的诱发因素与传播路径复杂化:任何一侧的故障均有可能越过两者边界进行传播,使得故障范围进一步扩大,影响配电网灾后恢复。一方面,恶意的信息攻击成为导致大停电事故的一大原因,信息层的故障也会削弱其对城市建筑行为与配电网的感知能力,甚至导致物理状态信息的丢失,影响配电网恢复决策的及时性与有效性;另一方面,电力设备的正常运行也需要物理层提供电力支持,物理层由自然灾害、人为操作导致的电力智能终端设备失灵将导致通信的延迟或中断,造成信息层的拥堵甚至故障。部分文献对电网信息层与物理层的协同态势感知展开了研究:文献[104]提出一种电力信息-物理系统(cyber-physical system, CPS)的级联故障模型与故障缓解策略;文献[105]分别从进攻者与防御者视角对面向电力 CPS 的信息层虚假数据注入的攻击过程与防护手段进行了分析与总结。上述文献主要将物理层与信息层的协同态势感知运用于故障预防与识别方面,

缺乏对其在故障分析与系统恢复方面应用的探索。

2.3.2 城市建筑与配电网信息共享与处理

目前,大部分用户数据的处理方式仍是集中式,城市建筑用户需要将本地设备数据上传给配电网运营商,由配电网运营商完成数据预处理、模型训练、模型预测等流程^[106]。然而,“数据孤岛”的困境使得城市建筑与配电网之间集中式数据处理方式不再适用。为了解决集中式机器学习的隐私泄漏问题,Google 研究团队于2016年首先提出了联邦学习(federated learning, FL)技术概念^[107]。文献[108]将联邦学习和集中式机器学习进行对比,发现联邦学习比集中式学习能更好地解决“数据孤岛”问题,实现用户隐私保护。

联邦学习框架为城市建筑与配电网数据共享提供了一种新的隐私保护范式:配电网运营商将初始城市建筑用能和交易模型发送给每个城市建筑用户,在每轮协作训练过程中,每个城市建筑基于本地数据库训练局部用能和交易模型,进行局部模型更新,并将局部模型发送给配电网运营商,配电网运营商收集所有局部模型后更新全局模型参数,并返回给每个城市建筑用户。联邦学习的模式虽然可以很好地保护用户原始用电数据,有效解决“数据孤岛”与隐私保护问题,但大部分联邦学习依赖于配电网运营商生成或更新全局模型参数,本质上仍然是一种典型的中心化结构,存在单点失效和隐私泄漏等问题^[109]。

联邦学习面临的挑战主要集中在安全性、隐私性、性能提升以及激励机制等方面。针对这些问题,区块链技术^[110-112]展现出了天然的优势:区块链本身不可篡改的特性与数字签名机制解决了中心服务器的不公平性行为 and 内部节点的恶意攻击,能够有效防止单点失效。此外,区块链中合理的激励机制可以提高各方参与全局模型训练的积极性。目前,已有部分文献研究了基于区块链的联邦学习架构^[113-117],通过区块链共识机制设计来实现在客户端上运行模型聚合的任务。文献[113]对现有基于区块链的联邦学习框架进行了综述与对比,探讨了区块链技术对联邦学习的提升作用,并阐述了该方法在物联网、医疗等领域的发展前景;文献[114, 116]分别采用区块链技术中的委员会共识机制与工作量证明共识机制,协调全局模型的聚合过程,提升联邦学习的整体效率;文献[117]将联邦学习、区块链技术与深度强化学习相结合,在减小训练能耗的同时加快了区块的生成速率。

目前,大部分关于联邦学习的研究采用同步通信的调度方式,即同步联邦学习,需要等待所有建筑

用户完成局部的能耗和交易模型训练后才会进行配电网层面的全局模型更新,这需要城市建筑用户花费大量的时间等待训练最慢的一方,效率太低,是“木桶理论”在同步联邦学习中的典型表现;而由于城市范围内的用户数量过于庞大,城市建筑用户局部模型之间的并行通信会导致资源紧张,存在通信阻塞的隐患进一步降低了联邦学习的效率。文献[109]在异步联邦学习框架的基础上,提出一种双因子调整机制以降低不可靠局部模型对全局模型质量的影响,在保护用户隐私的同时提升了模型效用;文献[118]提出一种新的异步联邦学习算法——联邦过时感知(federated staleness-aware, FedSA)算法,提升了模型精度与建模效率。如何在城联邦学习框架中融入区块链共识机制等技术解决恶意攻击和单点失效难题,并提升联邦学习效率,是实现城市建筑与配电网互动协调过程中数据共享和隐私保护的关键。

3 城市建筑与配电网高韧性协调运行挑战与展望

3.1 挑战

在国家“韧性城市”的政策背景下,“韧性配电网”作为“韧性城市”的重要支撑,可以有效提升城市风险防控能力,而城市建筑负荷的高比重和复杂、时变、多变特性是配电网负荷恢复过程中无法忽略的要素,城市建筑与配电网的深刻互动构成了复杂的CPSS。基于上述调研与分析,在城市建筑与配电网高韧性协调运行这一领域目前尚缺乏全面深入的研究,主要面临的挑战包括:

1)物理维度:城市建筑作为负荷参与配电网运行时,其在重新恢复供电后具有时变、多样和复杂的行为特性,尚缺乏数学解析化方法描述这些特征,进而建立包含负荷、储能与发电资源的城市建筑综合模型。此外,城市建筑负荷行为与配电网优化决策序列耦合机理不明。

2)社会维度:考虑到供电恢复过程中城市建筑产消者行为的多样性特征,可交易能源市场驱动的配电网负荷恢复属于前瞻性研究,目前仍处于起步阶段,存在产消者有限理性行为建模复杂、市场机制不完善、运行效率低等问题。

3)信息维度:一方面,信息维度的研究缺乏物理与信息层面的协调态势感知对系统故障进行分析与恢复,保障智能终端设备正常运行;另一方面,联邦学习为解决城市建筑产消者“数据孤岛”困境提供了新的范式,但仍面临单点故障、隐私泄漏和效率低下等问题。

4) CPSS 视角下的配电网负荷恢复策略:目前,配电网负荷恢复策略仍局限于配电网运行领域,较少涉及信息维度态势感知、数据共享以及社会维度的用户有限理性行为刻画与市场优化出清策略设计,城市建筑负荷行为与配电网恢复进程的复杂耦合关系也尚未在配电网负荷恢复决策中予以考虑。此外,随着信息技术的发展、市场机制的不断完善、用户行为的差异化发展,未来的配电网负荷恢复模型必然是一个高维、非线性、混合整数、多目标的复杂数学问题,有必要研究高效的配电网负荷恢复求解方法,降低模型求解难度。

3.2 未来研究思路

针对上述问题,如图6框架所示,未来可以围绕城市配电网韧性提升这一关键问题,以城市建筑和配电网为两个研究对象,分别从物理、社会和信息三个角度入手,开展极端条件下城市建筑与配电网耦合机理和建模方法(研究基础、物理维度),面向配电网韧性提升的城市建筑产消者行为建模与市场机制设计(激励机制、社会维度),考虑市场交易的城市建筑与配电网态势感知和数据共享架构(感知手段、信息维度),交易驱动的高韧性配电网负荷恢复决策(研究目标、综合维度)四个方面内容的研究,以城市建筑提升配电网韧性为出发点,探索电力系统、能源与环境、电力市场、行为经济学、机器学习等学科的交叉融合,实现城市配电网韧性提升。

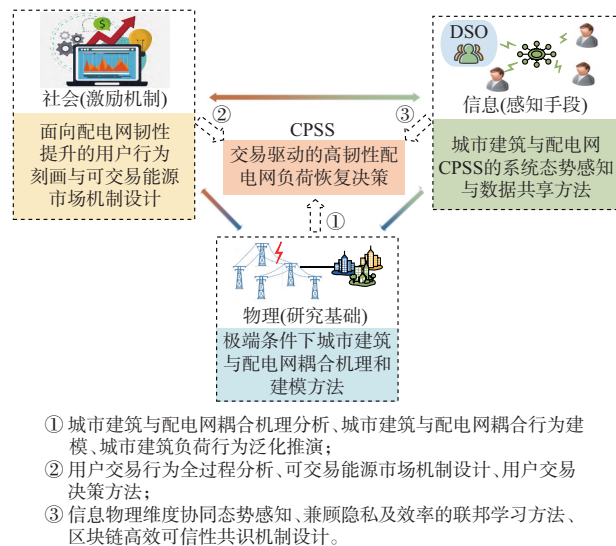


图6 城市建筑负荷与恢复决策强耦合互动下的城市配电网灾后恢复 CPSS 框架

Fig. 6 CPSS framework for post-disaster recovery of urban distribution network under strong coupling interaction of urban building load and recovery decision

1) 极端条件下城市建筑负荷与配电网决策序列

耦合机理和建模方法

针对配电网负荷恢复过程中城市建筑负荷异于常态的行为,首先,需要研究城市建筑负荷与配电网决策序列耦合的阶段划分原则与方法,综合考虑城市建筑负荷的时变性与多样性,基于概率状态转移马尔可夫过程等方法推演城市建筑 CLPU 状态演化机理和灵活调节潜力。其次,需要分析影响城市建筑典型资源负荷特性的自然环境、城市环境、人的行为等因素,建立城市建筑能耗-环境-人复杂因素下城市建筑负荷行为影响因素集合,充分考虑城市建筑空调系统、热水器、相变储能系统和 EV 等多种资源具有的“热储能”、“相变储能”及“移动储能”等柔性调节特性,研究城市建筑 CLPU 及“广义储能”建模方法,并结合知识-数据联合驱动等方法精准量化城市建筑负荷行为与配电网恢复进程的时变复杂耦合关系,以通用、低维的方式准确量化城市建筑负荷在配电网恢复过程中时变、多样、复杂行为。

通过此内容研究,可以厘清极端条件下城市建筑负荷与配电网决策序列耦合机理,建立城市建筑异于常态的 CLPU、多状态并存与切换、断电时长依赖的负荷模型及表征柔性调节能力的“广义储能”模型,为配电网韧性提升提供机理和模型基础。

2) 面向配电网韧性提升的城市建筑产消者行为模型与可交易能源市场机制设计

针对城市建筑产消者供电恢复后的用电偏好存在客观差异、非经济利益追求等有限理性特点,需要分析环境、主观偏好、客观条件等因素对灾后产消者用电及市场交易行为的影响,研究基于动机心理学等理论的城市建筑产消者行为多样性模型与其参与可交易能源市场的心理过程及其阶段划分;针对产消者参与市场交易的各个心理阶段,研究其心理演化过程的建模方法,量化产消者行为对市场环境的反应与相应影响;然后,基于用户交易全过程分析结果,需要利用纳什议价等经济学原理研究配电网故障情况下,包括市场准入规则、交易流程、出清机制、结算方法的交易能源市场机制设计,并分析极端条件下用户资源禀赋和个人偏好的不同,结合多心理账户理论研究可交易能源市场中城市建筑产消者交易决策方式。

通过此内容研究,可以建立面向配电网韧性提升的可交易能源市场机制,通过市场机制激发城市建筑产消者的负荷柔性调节与屋顶光伏等分布式能源的发电能力,提出市场环境下产消者行为机理与有限理性交易决策方法,利用交易提高配电网负荷恢复速度,在技术领域践行“以人为本”的社会价值理念。

3)城市建筑与配电网 CPSS 的态势感知和数据共享方法

针对城市建筑与配电网 CPSS 的态势感知,需要研究物理层与信息层交互协同的态势感知方法,并将其运用于配电网故障的分析与恢复领域,以保障智能终端设备的正常通信能力,保证极端情况下信息交互的时效性与安全性;针对联邦学习中心化结构的隐私泄漏和单点失效问题,需要研究基于区块链的联邦学习分布式架构,在联邦学习框架的基础上融入区块链的共识机制等技术,研究基于区块链的异步联邦学习算法和共识机制,在保护隐私的同时提升模型训练效率,结合委托权益证明(delegated proof of stake, DPoS)和实用拜占庭容错算法(practical Byzantine fault tolerance, PBFT)等算法,研究区块链可信性共识机制,以解决传统联邦学习对参数服务器的依赖,并提高联邦学习运行效率。

通过此内容研究,可以实现基于态势感知的信息通信技术和基于联邦学习和区块链的城市建筑与配电网数据共享架构和方法,通过城市建筑“本地数据本地处理”的分布式架构实现数据“可用不可见”,为配电网负荷恢复和可交易能源市场联合优化决策提供全局化信息。

4)CPSS 视角下高韧性配电网负荷恢复优化决策方法

首先,需要结合主动配电网技术,在城市建筑负荷与配电网协调运行的基础上,提出交易驱动的配电网负荷恢复框架,研究安全、可靠的配电网态势感知与数据共享技术,实现信息流、能量流和价值流在配电网负荷恢复过程中的有效流通和衔接,并从物理、社会、信息 3 个维度共同促进 CPSS 视角下的配电网负荷快速恢复;然后,针对恢复供电后的城市建筑负荷行为与配电网恢复进程的强耦合关系,需要利用“时间标签”技术和负荷恢复决策序列的差分计算等方法,对城市建筑负荷行为多样化的动态“选择”;最后,针对基于可交易能源市场的配电网负荷恢复是一个高维、非线性、混合整数、多目标优化问题,需要基于凸松弛和自适应多元分区(AMP)算法、拉格朗日松弛、基于交替优化与目标级联(AOP-ATC)等方法,对配电网负荷恢复和可交易能源市场出清联合优化问题进行求解。

通过此内容研究,可以动态选择城市建筑与配电网强耦合过程中的多样化行为,高效求解交易驱动的配电网负荷恢复决策模型,在提高城市建筑资源利用率的同时实现配电网韧性提升。

4 结语

在“韧性城市”的政策背景下,建设“韧性配电网”是建设“韧性城市”的重要一环,而城市建筑负荷是提升城市配电网韧性的重要抓手。极端情况下,城市建筑负荷与配电网的高韧性协调运行是一个复杂的 CPSS。本文重点关注配电网负荷恢复阶段,首先,阐述了重新供电后城市建筑负荷恢复面临的物理、社会与信息维度难题;然后,对物理维度的城市建筑负荷与配电网耦合机理、建模方法、求解算法,社会维度的城市建筑产消者行为建模、激励机制设计以及信息维度的灾后态势感知、数据共享方式进行了详细的述评;最后,深入剖析了目前极端条件下城市建筑负荷与配电网高韧性协调运行研究中存在的重点问题,展望了可交易能源市场、联邦学习等前沿技术方法在城市配电网韧性提升方面的应用潜力与趋势,提出了交易驱动的高韧性配电网负荷恢复优化决策框架。

CPSS 视角下城市建筑与配电网的协调运行为城市配电网韧性提升问题提供了独特的研究思路、前沿的系统性理论支撑以及多学科交叉的解决方案,有望充分调动极端情况下城市建筑产消者的柔性调节能力与反向供电能力,增强城市配电网灾后恢复能力,对推动“韧性城市”发展具有重要的理论意义与应用价值。

本文在撰写过程中得到江苏省科协青年科技人才托举工程(TJ-2022-042)、南京市留学人员科技创新项目,以及东南大学“至善青年学者”支持计划与中国电机工程学会“青年人才托举工程”项目的帮助,特此感谢!

参考文献

- [1] 朱正威,刘莹莹,杨洋.韧性治理:中国韧性城市建设的实践与探索[J].公共管理与政策评论,2021,10(3):22-31.
ZHU Zhengwei, LIU Yingying, YANG Yang. Resilient governance: practice and exploration of urban resilience building in China[J]. Public Administration and Policy Review, 2021, 10(3): 22-31.
- [2] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL].(2020-11-03)[2023-05-23]. https://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
Proposal of the Central Committee of the Communist Party of China on formulating the 14th Five-Year Plan for national economic and social development and the long-range goals for the next five years [EB/OL]. (2020-11-03) [2023-05-23]. https://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
- [3] 郑州灾后 48 小时:电力设备严重受损,影响 473 个小区[EB/OL].(2021-07-22)[2023-05-23].<https://baijiahao.baidu.com/s?>

- id=1705996501994140769&.wfr=spider&.for=pc.
48 hours after the Zhengzhou disaster: power equipment was severely damaged, affecting 473 communities [EB/OL]. (2021-07-22) [2023-05-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1705996501994140769&.wfr=spider&.for=pc>.
- [4] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [5] 侯慧, 尹项根, 陈庆前, 等. 南方部分 500 kV 主网架 2008 年冰雪灾害中受损分析与思考[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 12-15.
HOU Hui, YIN Xianggen, CHEN Qingqian, et al. Review on the wide area blackout of 500 kV main power grid in some areas of South China in 2008 snow disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 12-15.
- [6] 李少石. 高效配电网建设策略和可靠性目标研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
LI Shaoshi. Research on construction strategy and reliability target of efficient distribution network [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [7] 中国建筑能耗占国家总能耗 47% [EB/OL]. (2015-10-29) [2023-05-28]. https://www.sohu.com/a/38653459_115559.
China's building energy consumption accounts for 47% of the country's total energy consumption [EB/OL]. (2015-10-29) [2023-05-28]. https://www.sohu.com/a/38653459_115559.
- [8] LI Y Y, YAN Z, CHEN S J, et al. Operation strategy of smart thermostats that self-learn user preferences [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5770-5780.
- [9] 张博, 马梓耀, 王辰, 等. 含光储充一体化电站的城市交直流混合配电网韧性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 28-37.
ZHANG Bo, MA Ziyao, WANG Chen, et al. Resilience improvement strategy for urban AC/DC hybrid distribution network with photovoltaic-storage-charging integrated station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 28-37.
- [10] GAN W, YAN M Y, YAO W, et al. Multi-network coordinated hydrogen supply infrastructure planning for the integration of hydrogen vehicles and renewable energy [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2875-2886.
- [11] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-26) [2023-08-27]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644984.htm?eqid=994d1e71000038e700000066475e6d8.
Notice of the State Council on issuing the action plan for carbon peak before 2030 [EB/OL]. (2021-10-26) [2023-08-27]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644984.htm?eqid=994d1e71000038e700000066475e6d8.
- [12] 国家能源局综合司关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知 [EB/OL]. (2021-09-15) [2023-08-27]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content_5637323.htm.
Notice of the Comprehensive Department of the National Energy Administration on publishing the pilot list of rooftop distributed photovoltaic development in the whole county (city, district) [EB/OL]. (2021-09-15) [2023-08-27]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content_5637323.htm.
- [13] 刘念, 余星火, 王剑辉, 等. 泛在物联网的配用电优化运行: 信息物理社会系统的视角[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 1-12.
LIU Nian, YU Xinghuo, WANG Jianhui, et al. Optimal operation of power distribution and consumption system based on ubiquitous Internet of Things: a cyber-physical-social system perspective [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 1-12.
- [14] 陈启鑫, 王克道, 陈思捷, 等. 面向分布式主体的可交易能源系统: 体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 1-7.
CHEN Qixin, WANG Kedao, CHEN Sijie, et al. Transactive energy system for distributed agents: architecture, mechanism design and key technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7.
- [15] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [16] 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.
- [17] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6783.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6783.
- [18] 黄武靖, 司方远, 张宁, 等. 面向韧性的城市能源系统安全规则提取及优化运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 1-8.
HUANG Wujing, SI Fangyuan, ZHANG Ning, et al. Resilience-oriented security rule extraction and optimal operation for urban energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 1-8.
- [19] 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.
- [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] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5731.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5731.
- [22] CHEN B, CHEN C, WANG J H, et al. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6793-6805.
- [23] SONG M, NEJAD R R, SUN W. Robust distribution system

- load restoration with time-dependent cold load pickup[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3204-3215.
- [24] 裴振坤,王学梅,康龙云.电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J].电力系统自动化,2023,47(18):17-32.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 17-32.
- [25] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰.需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度[J].电力系统自动化,2021,45(6):148-157.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Reserve optimization and real-time scheduling of frequency regulation ancillary service with participation of flexible resource on demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 148-157.
- [26] GONZÁLEZ VAYÁ M, ANDERSSON G. Optimal bidding strategy of a plug-in electric vehicle aggregator in day-ahead electricity markets under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2375-2385.
- [27] 王月汉,刘文霞,姚齐,等.面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(15):37-45.
WANG Yuehan, LIU Wenxia, YAO Qi, et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 37-45.
- [28] LIU R P, HOU Y H, LI Y J, et al. Sample robust scheduling of electricity-gas systems under wind power uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5889-5900.
- [29] WANG C, WANG Z Y, HOU Y H, et al. Dynamic game-based maintenance scheduling of integrated electric and natural gas grids with a bilevel approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4958-4971.
- [30] 黄弦超,张粒子,TAYLOR G.考虑负荷控制的配电网故障恢复[J].电力系统自动化,2010,34(17):22-26.
HUANG Xianchao, ZHANG Lizi, TAYLOR G. Service restoration of power distribution systems with load control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 22-26.
- [31] LI Y, XIAO J X, CHEN C, et al. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4138-4150.
- [32] WANG C, JU P, LEI S B, et al. Markov decision process-based resilience enhancement for distribution systems: an approximate dynamic programming approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2498-2510.
- [33] 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.
- [34] 王红斌,方健,何嘉兴,等.极端灾害下配电网韧性研究综述[J].供用电,2019,36(7):20-29.
WANG Hongbin, FANG Jian, HE Jiaying, et al. A review of resilient distribution network under extreme disasters [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 20-29.
- [35] 陈玥,刘锋,魏韡,等.需求侧能量共享:概念、机制与展望[J].电力系统自动化,2021,45(2):1-11.
CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 1-11.
- [36] 康重庆,刘静琨,张宁.未来电力系统储能的新形态:云储能[J].电力系统自动化,2017,41(21):2-8.
KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning, et al. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8.
- [37] KAHNAMOUEI A S, LOTFIFARD S. Enhancing resilience of distribution networks by coordinating microgrids and demand response programs in service restoration [J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 3048-3059.
- [38] ZHANG B, ZHANG L, TANG W, et al. A coordinated restoration method of electric buses and network reconfiguration in distribution systems under extreme events [J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems: 1-9 [2023-05-28]. <http://10.17775/CSEEJPES.2020.04320>.
- [39] POUDEL S, DUBEY A, SCHNEIDER K P. A generalized framework for service restoration in a resilient power distribution system[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 252-263.
- [40] WANG Y, SU X, SONG M, et al. Sequential load restoration with soft open points and time-dependent cold load pickup for resilient distribution systems [J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid [2023-07-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10086632>.
- [41] 邵成成,李徐亮,钱涛,等.基于交通均衡的电动汽车快速充电负荷模拟[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1368-1376.
SHAO Chengcheng, LI Xuliang, QIAN Tao, et al. Simulation of EV fast charging load based on traffic equilibrium [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1368-1376.
- [42] 甘伟,郭剑波,艾小猛,等.应用于风电场出力平滑的多尺度多指标储能配置[J].电力系统自动化,2019,43(9):92-98.
GAN Wei, GUO Jianbo, AI Xiaomeng, et al. Multi-scale multi-index sizing of energy storage applied to fluctuation mitigation of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 92-98.
- [43] 汤奕,崔晗,李峰,等.人工智能在电力系统暂态问题中的应用综述[J].中国电机工程学报,2019,39(1):2-13.
TANG Yi, CUI Han, LI Feng, et al. Review on artificial intelligence in power system transient stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 2-13.
- [44] SONG M, GAO C W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Multi-time-scale modeling and parameter estimation of TCLs for smoothing out wind power generation variability [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 105-118.
- [45] SONG M, GAO C W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Impact of uncertain parameters on TCL power capacity calculation via HDMR for generating power pulses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3112-3124.
- [46] 刘伟佳,孙磊,林振智,等.含间歇电源、储能和电动汽车的配电网孤岛短时恢复供电策略[J].电力系统自动化,2015,39(16):49-58.

- LIU Weijia, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Short-period restoration strategy in isolated electrical islands with intermittent energy sources, energy storage systems and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 49-58.
- [47] LI J X, XU Y, WANG Y. Critical load restoration method for unbalanced distribution systems based on linear approximation [C]// 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), November 4-6, 2018, Beijing, China: 70-75.
- [48] CIRIC R M, POPOVIC D S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(7): 497-505.
- [49] CARVALHO P M S, FERREIRA L A F M, BARRUNCHO L M F. Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007, 29(3): 222-229.
- [50] 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.
- [51] 王守相, 王林, 王洪坤, 等. 地震灾害下提升恢复力的配电网优化恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 28-35.
- WANG Shouxiang, WANG Lin, WANG Hongkun, et al. Optimal recovery strategy for distribution network to improve its resilience under earthquake disasters [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 28-35.
- [52] 尹航, 刘友波, 高红均, 等. 含分布式储能系统的交直流混合配电网负荷恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 25-32.
- YIN Hang, LIU Youbo, GAO Hongjun, et al. Load recovery strategy of AC/DC hybrid distribution network with distributed energy storage systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 25-32.
- [53] 霍崇辉, 王淳, 陶多才, 等. 考虑精准负荷控制的配电网供电恢复策略[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 4020-4026.
- HUO Chonghui, WANG Chun, TAO Duocai, et al. Restoration strategy of distribution network considering precise load control [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 4020-4026.
- [54] 向月, 刘俊勇, 姚良忠, 等. 故障条件下含分布式电源配网的孤岛划分与重构优化策略研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1025-1032.
- XIANG Yue, LIU Junyong, YAO Liangzhong, et al. Optimization strategy for island partitioning and reconfiguration of faulted distribution network containing distributed generation [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1025-1032.
- [55] 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.
- [56] 娄铖伟, 张筱慧, 丛鹏伟, 等. 含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 23-31.
- LOU Chengwei, ZHANG Xiaohui, CONG Pengwei, et al. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 23-31.
- [57] 陈昕玥, 唐巍, 陈禹, 等. 基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 99-106.
- CHEN Xinyue, TANG Wei, CHEN Yu, et al. Chance constrained programming based fault recovery of distribution network containing photovoltaic generations [J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 99-106.
- [58] 张利民, 马强, 李振坤, 等. 基于禁忌克隆遗传算法的配电网故障恢复重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 60-64.
- ZHANG Limin, MA Qiang, LI Zhenkun, et al. Service restoration reconfiguration in distribution network based on tabu clonal genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 60-64.
- [59] 向小蓉, 刘涤尘, 向农, 等. 基于并行禁忌搜索算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 100-105.
- XIANG Xiaorong, LIU Dichen, XIANG Nong, et al. Distribution network reconfiguration based on parallel tabu search algorithm [J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 100-105.
- [60] SRIVASTAVA I, BHAT S, SURYA VARDHAN B V, et al. Fault detection, isolation and service restoration in modern power distribution systems: a review [J]. Energies, 2022, 15(19): 7264.
- [61] 曾业运. 基于DG孤岛运行的配电网供电恢复策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- ZENG Yeyun. Research on power supply recovery strategy of distribution network based on DG island operation [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [62] 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.
- [63] POUDEL S, DUBEY A. Critical load restoration using distributed energy resources for resilient power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 52-63.
- [64] WANG Z W, SHEN C, XU Y, et al. Risk-limiting load restoration for resilience enhancement with intermittent energy resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2507-2522.
- [65] CHEN B, YE Z G, CHEN C, et al. Toward a MILP modeling framework for distribution system restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1749-1760.
- [66] WANG Z Y, WANG J H. Service restoration based on AMI and networked MGs under extreme weather events [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(2): 401-408.
- [67] 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.
- [68] 许寅,王颖,和敬涵,等.多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法[J].*电力系统自动化*,2020,44(2):123-131.
XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 123-131.
- [69] LIU W J, ZHAN J P, CHUNG C Y. A novel transactive energy control mechanism for collaborative networked microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2048-2060.
- [70] SONG M, SUN W, WANG Y F, et al. Hierarchical scheduling of aggregated TCL flexibility for transactive energy in power systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2452-2463.
- [71] MORSTYN T, MCCULLOCH M D. Multiclass energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 4005-4014.
- [72] LI J Y, ZHANG C R, XU Z, et al. Distributed transactive energy trading framework in distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 7215-7227.
- [73] CUI S C, WANG Y W, SHI Y, et al. An efficient peer-to-peer energy-sharing framework for numerous community prosumers [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(12): 7402-7412.
- [74] SOUSA T, SOARES T, PINSON P, et al. Peer-to-peer and community-based markets: a comprehensive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104: 367-378.
- [75] 蔡浩,黄博,高赐威,等.考虑用户用电效用的售电公司交易联合优化策略[J].*电力需求侧管理*,2021,23(6):31-36.
CAI Hao, HUANG Bo, GAO Ciwei, et al. Joint optimization strategy for electricity retailers' transaction considering the utility of users' electricity consumption [J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(6): 31-36.
- [76] 吴赋章,杨军,林洋佳,等.考虑用户有限理性的电动汽车时空行为特性[J].*电工技术学报*,2020,35(7):1563-1574.
WU Fuzhang, YANG Jun, LIN Yangjia, et al. Research on spatiotemporal behavior of electric vehicles considering the users' bounded rationality [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(7): 1563-1574.
- [77] CHEN L D, LIU N, LI C C, et al. Peer-to-peer energy sharing with social attributes: a stochastic leader-follower game approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(4): 2545-2556.
- [78] YAO Y T, GAO C W, CHEN T, et al. Distributed electric energy trading model and strategy analysis based on prospect theory [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 131: 106865.
- [79] SONG M, GAO C W. Integration of distributed resources in smart grids for demand response and transactive energy: a case study of TCLs [M]. Singapore: Springer Singapore, 2022.
- [80] 姜勇,李婷婷,王蓓蓓,等.美国需求响应参与PJM批发电力市场运行及对我国的启示[J].*电力需求侧管理*,2015,17(1): 62-64.
JIANG Yong, LI Tingting, WANG Beibei, et al. The demand response to participate in the PJM wholesale electricity market operation and enlightenment to our country [J]. *Power Demand Side Management*, 2015, 17(1): 62-64.
- [81] 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.
- [82] LI Y J, SUN W, YIN W Q, et al. Restoration strategy for active distribution systems considering endogenous uncertainty in cold load pickup [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(4): 2690-2702.
- [83] 武昭原,周明,王剑晓,等.双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J].*中国电机工程学报*,2022,42(21):7746-7763.
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(21): 7746-7763.
- [84] BHATTARAI B P, ALAM J, HANSEN J, et al. Enhancing distribution system resiliency through a novel transactive energy systems framework [C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, USA: 1-5.
- [85] 王浩然,陈思捷,严正,等.基于区块链的电动汽车充电站充电权交易:机制、模型和方法[J].*中国电机工程学报*,2020,40(2):425-435.
WANG Haoran, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Blockchain-enabled charging right trading among EV charging stations: mechanism, model, and method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2): 425-435.
- [86] LIU N, TAN L, SUN H N, et al. Bilevel heat-electricity energy sharing for integrated energy systems with energy hubs and prosumers [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(6): 3754-3765.
- [87] NAKAYAMA K, MOSLEMI R, SHARMA R. Transactive energy management with blockchain smart contracts for P2P multi-settlement markets [C]// 2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), February 18-21, 2019, Washington, USA: 1-5.
- [88] DONG J J, ZHU L, DONG Q H, et al. Integrating transactive energy into reliability evaluation for a self-healing distribution system with microgrid [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(1): 122-134.
- [89] HUANG P, KALAGNANAM J, NATARAJAN R, et al. Analytics and transactive control design for the Pacific northwest smart grid demonstration project [C]// 2010 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg, USA: 449-454.
- [90] ZHU S, SONG M L, LIM M K, et al. The development of energy blockchain and its implications for China's energy sector [J]. *Resources Policy*, 2020, 66: 101595.
- [91] World's first high-frequency decentralized energy market helps

- drive port of Rotterdam's energy transition [EB/OL]. (2020-10-05) [2023-09-02]. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/about-commodityinsights/media-center/press-releases/2020/051020-world-s-first-high-frequency-decentralized-energy-market-drive-port-of-rotterdam-energy-transition>.
- [92] Energo boost clean energy production through Qtum blockchain implementation in Philippines [EB/OL]. (2018-04-09) [2023-09-02]. <https://www.geospatialworld.net/news/energo-clean-energy-production-qtum-blockchain/>.
- [93] MIHAYLOV M, JURADO S, AVELLANA N, et al. NRGcoin: virtual currency for trading of renewable energy in smart grids [C]// 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14), May 28-30, 2014, Krakow, Poland: 1-6.
- [94] MOSLEHI K, KUMAR A B R. Autonomous resilient grids in an IoT landscape vision for a nested transactive grid [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 4089-4096.
- [95] 黄蔓云, 卫志农, 孙国强, 等. 基于历史数据挖掘的配电网态势感知方法 [J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1139-1145.
HUANG Manyun, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A novel situation awareness approach based on historical data-mining model in distribution networks [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1139-1145.
- [96] 贾宏杰, 穆云飞, 侯恺, 等. 能源转型视角下城市能源系统的形态演化及运行调控 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 49-62.
JIA Hongjie, MU Yunfei, HOU Kai, et al. Morphology evolution and operation regulation of urban energy system from perspective of energy transition [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 49-62.
- [97] 满延露, 刘敏, 王锴. 主动配电网态势感知技术研究综述与展望 [J/OL]. *电子科技* [2023-05-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1291.TN.20221213.1546.001.html>.
MAN Yanlu, LIU Min, WANG Kai. Review and prospect of research on situation awareness technology of active distribution network [J/OL]. *Electronic Science and Technology* [2023-05-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1291.TN.20221213.1546.001.html>.
- [98] WINKLER J, DUEÑAS-OSORIO L, STEIN R, et al. Performance assessment of topologically diverse power systems subjected to hurricane events [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(4): 323-336.
- [99] SODHI R, SHARIEFF M I. Phasor measurement unit placement framework for enhanced wide-area situational awareness [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(2): 172-182.
- [100] TRINDADE F C L, FREITAS W, VIEIRA J C M. Fault location in distribution systems based on smart feeder meters [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(1): 251-260.
- [101] CHEN C, WANG J H, TON D. Modernizing distribution system restoration to achieve grid resiliency against extreme weather events: an integrated solution [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(7): 1267-1288.
- [102] 刘鑫蕊, 李欣, 孙秋野, 等. 考虑冰灾环境的配电网态势感知和薄弱环节辨识方法 [J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2243-2250.
LIU Xinrui, LI Xin, SUN Qiuye, et al. A new method for situation awareness and weakness identification of distribution network considering ice disaster [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2243-2250.
- [103] 何俊, 于华, 邓长虹, 等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(4): 1277-1285.
HE Jun, YU Hua, DENG Changhong, et al. Power supply guarantee strategy for key regional power grid load based on situation awareness in extreme weather [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(4): 1277-1285.
- [104] HAN Y Q, GUO C X, MA S Y, et al. Modeling cascading failures and mitigation strategies in PMU based cyber-physical power systems [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(5): 944-957.
- [105] 王琦, 邵伟, 汤奕, 等. 面向电力信息物理系统的虚假数据注入攻击研究综述 [J]. *自动化学报*, 2019, 45(1): 72-83.
WANG Qi, TAI Wei, TANG Yi, et al. A review on false data injection attack toward cyber-physical power system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 72-83.
- [106] 闪鑫, 陆晓, 翟明玉, 等. 人工智能应用于电网调控的关键技术分析 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(1): 49-57.
SHAN Xin, LU Xiao, ZHAI Mingyu, et al. Analysis of key technologies for artificial intelligence applied to power grid dispatch and control [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1): 49-57.
- [107] MCMAHAN H B, MOORE E, RAMAGE D, et al. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data [C]// *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*, April 20-22, 2017, Fort Lauderdale, USA.
- [108] DRAINAKIS G, KATSAROS K V, PANTAZOPOULOS P, et al. Federated vs. centralized machine learning under privacy-elastic users: a comparative analysis [C]// *2020 IEEE 19th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*, November 24-27, 2020, Cambridge, USA: 1-8.
- [109] 高胜, 袁丽萍, 朱建明, 等. 一种基于区块链的隐私保护异步联邦学习 [J]. *中国科学(信息科学)*, 2021, 51(10): 1755-1774.
GAO Sheng, YUAN Liping, ZHU Jianming, et al. A blockchain-based privacy-preserving asynchronous federated learning [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2021, 51(10): 1755-1774.
- [110] 颜拥, 陈星莺, 文福拴, 等. 从能源互联网到能源区块链: 基本概念与研究框架 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(2): 1-14.
YAN Yong, CHEN Xingying, WEN Fushuan, et al. From Energy Internet to energy blockchain: basic concept and research framework [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(2): 1-14.
- [111] 赵丙镇, 陈智雨, 闫龙川, 等. 基于区块链架构的电力业务交易数据隐私保护 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(17): 20-26.
ZHAO Bingzhen, CHEN Zhiyu, YAN Longchuan, et al. Privacy protection of power business transaction data based on blockchain framework [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(17): 20-26.
- [112] 张玲, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链共识机制的多区域最优

- 潮流分布式算法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6433-6441.
- ZHANG Ling, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Distributed multi-area optimal power flow algorithm based on blockchain consensus mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6433-6441.
- [113] 孙睿,李超,王伟,等. 基于区块链的联邦学习研究进展[J]. 计算机应用, 2022, 42(11): 3413-3420.
- SUN Rui, LI Chao, WANG Wei, et al. Research progress of blockchain-based federated learning[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(11): 3413-3420.
- [114] QU Y Y, GAO L X, LUAN T H, et al. Decentralized privacy using blockchain-enabled federated learning in fog computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5171-5183.
- [115] HOU D K, ZHANG J, MAN K L, et al. A systematic literature review of blockchain-based federated learning: architectures, applications and issues [C]// 2021 2nd Information Communication Technologies Conference (ICTC), May 7-9, 2021, Nanjing, China: 302-307.
- [116] LI Y Z, CHEN C, LIU N, et al. A blockchain-based decentralized federated learning framework with committee consensus[J]. IEEE Network, 2021, 35(1): 234-241.
- [117] HIEU N Q, ANH T T, LUONG N C, et al. Resource management for blockchain-enabled federated learning: a deep reinforcement learning approach [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://arxiv.org/abs/2004.04104.pdf>.
- [118] CHEN M, MAO B C, MA T Y. FedSA: a staleness-aware asynchronous federated learning algorithm with non-IID data [J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 120: 1-12.

宋 梦(1989—),女,通信作者,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向:需求响应与虚拟电厂、电力市场、配电网韧性提升与优化运行。E-mail:msong_seu@seu.edu.cn

周佳妮(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向:需求响应、配电网市场。E-mail:jenniezhou0131@163.com

高赐威(1977—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力需求侧管理及需求响应、电力市场与电力监管、能源互联网与电力规划。E-mail:ciwei.gao@seu.edu.cn

(编辑 章黎)

High-resilience Coordinated Operation of Urban Buildings and Distribution Networks from Cyber-Physical-Social System Perspective: Research Review and Prospect

SONG Meng¹, ZHOU Jiani¹, GAO Ciwei¹, YAN Mingyu², LI Mao³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. State Grid International Development Company, Beijing 100031, China)

Abstract: “Resilience” is an important attribute of cities in responding to natural disasters and improving their risk prevention and control capabilities. Frequent blackouts will cause serious economic and livelihood losses, hinder urban development and even threaten national energy security. “Resilient distribution network” is the inevitable requirement and basic guarantee of “resiliency”. The high proportion of building load is the main characteristic of urban distribution networks. The behavior of building load after power supply recovery is different from that in normal state, which not only puts higher requirements on power supply, but also provides the distribution network with resilience to enhance its potential. Urban buildings are one of the main places where users interact deeply with the power system, electricity market, big data, etc. Its coordinated operation with the distribution network is a complex cyber-physical-social system (CPSS). First, this paper focuses on the load recovery stage of the urban distribution network and summarizes the problems faced by the current high-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks in the physical, social and cyber dimensions. Then, the current research status of the coupling mechanism and modeling of urban buildings and distribution networks under extreme conditions (physical dimension), behavior characterization and incentive mechanism design of urban building prosumers (social dimension), and post-disaster situation awareness and data sharing of distribution network (cyber dimension) are reviewed. Finally, the four challenges faced by the research on the high-resilience coupling operation of urban buildings and distribution networks from the perspective of CPSS are summarized, and future research paths are prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52277085).

Key words: cyber-physical-social system (CPSS); urban building; distribution network; resilience

