

# 考虑不确定性扰动的含海量资源配电网弹性研究综述

苏译<sup>1,2</sup>, Jiashen TEH<sup>1</sup>, 柏智<sup>2</sup>, 胡长华<sup>3</sup>, 吴芳榕<sup>4</sup>

(1. 马来西亚理科大学电气与电子工程学院, 高渊 11800, 马来西亚;

2. 智慧城市能源感知与边缘计算湖南省重点实验室(湖南城市学院), 湖南省益阳市 413000;

3. 广东电网有限责任公司中山供电局, 广东省中山市 528400; 4. 湖南汽车工程职业学院, 湖南省株洲市 412001)

**摘要:** 分布式电源、微电网、储能装置等海量灵活资源接入配电网使得弹性配电网成为可能。然而,上述资源在协同抵御外界冲击、恢复电网正常运行方面的潜力有待进一步挖掘。配电网中,海量资源的时空深度耦合使得其结构与控制日趋复杂,源网荷任意侧的波动都可能引发连锁故障,影响配电网安全运行。为此,文中提出考虑不确定性扰动的含海量资源配电网弹性研究框架,将抵御外部灾害与平抑内部波动纳入研究范畴。首先,拓展配电网弹性内涵,总结配电网现有灵活资源,提出含海量资源高弹性配电网结构并对其特征进行分析;其次,分别从静态拓扑与动态响应角度提出结构弹性指标、系统弹性指标实现定量分析;然后,将不确定性扰动划分为外部冲击与内部波动,并提出配电网弹性研究框架,对其数据基础、理论支撑与弹性提升技术、应用场景进行了详细梳理与讨论;最后,对含海量资源高弹性配电网进行了展望。

**关键词:** 配电网; 新型电力系统; 弹性; 海量资源; 储能; 微电网; 扰动; 不确定性

## 0 引言

Resilience 被译为“弹性”或“韧性”<sup>[1]</sup>,主要用于评价个体或系统受到扰动后的恢复能力<sup>[2]</sup>。根据上述定义,电网弹性最初是指抵御冲击、承担初始故障后果并快速恢复供电的能力。文献[3]构建了台风灾害下输电系统的弹性评估场景,指出了提高电网弹性的措施。文献[4]模拟拒绝服务攻击信息物理融合电力系统,提出了弹性触发机制。文献[5]量化极端天气对电网的影响,采用聚类方法缩减极端场景,构建了电网弹性评估模型。目前,电网弹性研究主要集中在外界冲击对电网的损害评估以及提升恢复能力等方面。

配电网作为连接用户和电网的末端,直接影响供电用户。传统配电网结构简单,潮流为单向流动<sup>[6]</sup>,弹性恢复能力较差。随着新能源接入规模的不断增大<sup>[7]</sup>,配电网由单一电源、辐射状结构转变成多电源供电的综合能源系统<sup>[8]</sup>,使得弹性恢复成为可能。极端天气、不可预测用电行为(疫情<sup>[9]</sup>、网络

攻击<sup>[10]</sup>等)的频发对配电网提出了新的要求。配电网建设速度与用电量快速增长之间的矛盾<sup>[11]</sup>(例如短时负荷尖峰或负荷转供等应急场景)需要进一步缓解。分布式电源和柔性负荷的不确定性波动<sup>[12]</sup>需要配电网吸收。特别是短期负荷高峰或转供等应急场景需要弹性配电网等技术的应用。同时,分布式电源和新能源汽车的大规模接入使得配电网波动加剧<sup>[12]</sup>。因此,含海量资源的配电网弹性研究亟待展开。

目前,国内外学者对配电网弹性研究尚处于定义与框架阶段,未充分考虑源网荷储的深度互动、不确定性增加的特点。因此,单纯考虑外界冲击的弹性电网定义与框架难以适用于含海量资源的配电网,一种综合考虑内外不确定性扰动的配电网弹性框架有待提出。

配电网弹性研究还需要提出关键指标用以定量分析。文献[5]考虑不同极端天气场景下构建配电网防灾和减灾过程的弹性评估指标体系。文献[13]将通信纳入考虑范畴,构建了受通信故障影响的配电网灾后恢复弹性评价方法。文献[14]将复杂网络理论纳入极端扰动下的弹性评估考虑范围。文献[15]根据脆弱性辨识电网关键设备和拓扑,研究提高其抗扰动能力。考虑到配电网运行过程中面临尖峰负荷造成的应急场景与极端冲击造成的灾害场

收稿日期: 2021-09-05; 修回日期: 2022-01-28。

上网日期: 2022-03-23。

湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ60024); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(20B316); 中国南方电网有限责任公司科技项目(032000HK42180007)。

景,一种涵盖配电网各场景的弹性评价体系是配电网弹性研究不可或缺的部分。

本文扩展配电网弹性内涵,分析高弹性配电网结构与特征,提出结构弹性与系统弹性指标,将不确定性扰动划分为外部冲击与内部波动,提出了综合考虑上述扰动的配电网弹性研究框架,对框架数据基础、理论支撑与弹性提升技术、应用场景展开分析与阐述。

## 1 含海量资源高弹性配电网结构与特征

### 1.1 配电网弹性内涵的扩展

自从“弹性”概念引入电力系统后,许多学者认为弹性是针对小概率-高损失极端事件的预防、抵御以及快速恢复负荷的能力<sup>[16]</sup>。就配电网而言,目前源网荷储波动能被配电网承载,未形成极端事件。但随着中国国家层面提出“双碳”目标,未来非化石能源在一次能源消费的占比将超过80%<sup>[17]</sup>,且以可再生能源(例如风电、光伏发电)接入配电网为主。届时,配电网将成为源网荷储深度耦合的系统,网内海量资源的波动性、不确定性给系统安全稳定运行带来新的挑战。

为了应对上述情况,文章有必要将“弹性”内涵进行扩展。“Resilience”源自拉丁文“resilio”,其本意为恢复到原始状态<sup>[2]</sup>,用于电力系统则表示恢复到系统最优运行状态。因此,本文认为“弹性”是抵抗扰动、保持最优运行的能力。此处的扰动既包括极端天气、网络攻击等造成的外部冲击,又包括高渗透率分布式电源、电动汽车等灵活资源导致的系统内部波动。最优运行是指当下场景的最佳状态,包括正常场景的经济运行、应急场景的协同优化和灾害场景的恢复控制。

鉴于上述定义,配电网弹性是指充分挖掘系统内资源的潜在价值,保证不同资源之间协同优化,实现配电网在正常情况下经济运行、在应急场景下平抑波动、在灾害场景下最大程度恢复供电。

### 1.2 海量资源分布与影响

随着分布式电源、储能装置、电动汽车等的大量接入,配电网内的资源日趋丰富。本文总结了配电网海量资源<sup>[18-27]</sup>,并在规模化接入的前提下分析其行为特征及对配电网的影响,具体如附录A表A1所示。

由附录A表A1可知,配电网接入海量资源后,源网荷储深度互动具有多重不确定性<sup>[28]</sup>;电源侧增加了分布式电源,具有强随机性与波动性;网架侧的传统设备具备动态增容能力,加上柔性互联配电系统电力电子器件的控制复杂化<sup>[29]</sup>,使得配电网的供

电灵活性大增;用户侧的用电行为存在明显无序性和集群效应,加重了配电网负荷峰值时期的负担;储能装置兼有电源/负荷双重功能,使得潮流不确定性增强。

需要指出,上述资源虽然导致多重不确定性,但其协同优化控制<sup>[30]</sup>可为配电网弹性提升带来新的可能。

### 1.3 含海量资源高弹性配电网结构

海量资源接入配电网后,伴随新型信息技术的提出与工程化应用,配电网在电源、网架、负荷侧的资源相继被挖掘,其典型结构如图1所示。图中:VSC(voltage source converter)表示电压源型换流器,实现交流配电网AC/DC转换;MVDC(medium-voltage direct current)表示中压直流线路;DC/AC换流器作为交流并入直流配电网接口装置,实现中压直流配电网与交流配电网、风力发电装置互联;DC/DC换流器可实现宽频调压,与直流负载连接<sup>[31]</sup>。

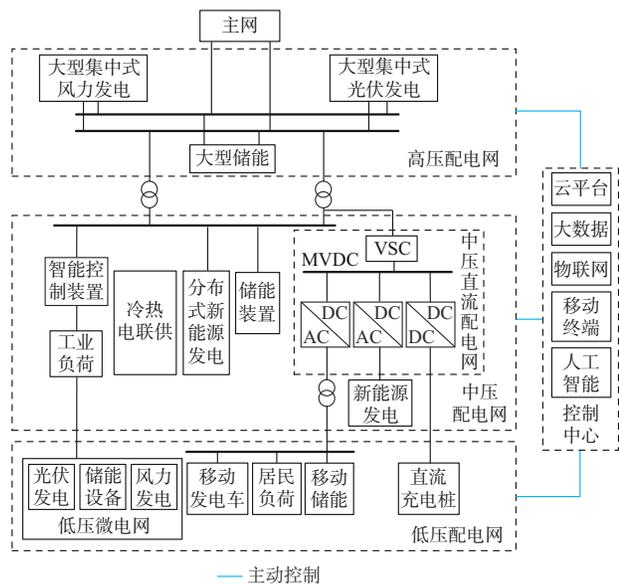


图1 含海量资源高弹性配电网结构框图

Fig. 1 Structural block diagram of highly resilient distribution network with massive resources

由图1可知,含海量资源高弹性配电网以交流电网为主干,辅以直流互联配电网,广泛接入新能源、微电网、储能设备与可控负荷,运用“云大物移智”<sup>[32]</sup>等技术手段,对网内各资源进行态势感知<sup>[33]</sup>,实现全网资源的信息耦合与数据驱动,满足弹性要求。

### 1.4 含海量资源高弹性配电网特征

含海量资源高弹性配电网能充分利用网内资源,具备以下特征:

### 1)高承受力

传统配电网在受到极端冲击时,只能依靠继电保护装置实现最大程度恢复供电<sup>[34]</sup>,易造成停电范围扩大、恢复供电不及时等问题。随着分布式电源的接入,配电网转变成多电源供电模式。外部冲击时,高弹性配电网能通过调整运行模式、改变拓扑<sup>[35]</sup>等方式最大限度地缩小停电范围,通过精准投入应急发电车<sup>[21]</sup>与储能装置<sup>[36]</sup>恢复配电网故障区域供电,提高对外部冲击的承受能力;内部波动时,配电网海量资源协同调度可形成优势互补,提高对波动的承受能力(如利用储能装置<sup>[37]</sup>集群的调压控制解决配电网电压越限问题)。

### 2)快速恢复

对于不可抗力因素,传统配电网依靠人工抢修恢复供电。而高弹性配电网可最大限度地调动电网内部资源,通过灾前预防、灾中调节、灾后协同恢复<sup>[38]</sup>变换网架拓扑与潮流模式,达到快速恢复供电的目的。

### 3)高利用率

传统配电网运行是在满足安全、可靠的前提下,提前规划容量、协调负荷与发电机组。这种方式存在新能源并网率较低、设备利用率不高<sup>[39]</sup>、用电负荷弹性不够等问题。高弹性配电网可以加强电网内部各参与者的信息交流,引导用户的用电行为,提升用户侧的弹性。通过感知网络中各个设备的情况,改变传统设备静态稳定性判据,实现动态增容,唤醒网架侧资源,发挥海量资源的整合能力<sup>[40]</sup>,解决电源侧新能源发电并网率不高的问题。

## 2 配电网弹性关键指标

为了评估个体或系统的弹性能力,国内外学者分别从静态预防角度和动态恢复角度提出量化方法与框架,并针对某些特定灾害场景或运行模式对指标展开细化。目前,配电网弹性关键指标包括结构弹性指标(静态指标)和系统弹性指标(动态指标)。

### 2.1 配电网结构弹性指标

配电网弹性研究首先考虑抵抗冲击,即通过加固关键设备、改善网架结构来抵御灾害侵袭。因此,结构弹性指标从静态角度出发,通过衡量配电网关键节点脆弱性、网架结构抗毁性和网络级联特性对配电网弹性定量描述。

对于外界极端天气的影响,首要考虑的是设备损毁引起的停电,因此,可通过计算关键设备故障概率判断其脆弱性,间接衡量配电网结构的弹性。文献[14,41-43]对配电网导线、电杆、关键组件等设备故障概率进行计算,通过量化设备的脆弱性,衡量配

电网抵御灾害的能力。上述方法从概率角度出发,以设备故障概率及损坏后对系统的影响(负荷损失)判断设备关键程度,通过加固关键设备提高配电网弹性。但是,该方法将设备(节点)与网架(网络)割裂开来,未进行统一考虑。

一般情况下,外界极端天气对电网的损害不会集中于某一个设备,因此,衡量区域乃至整个配电网抗毁性也是结构弹性必须考虑的问题。文献[44]在考虑关键设备脆弱性基础上,结合拓扑、网络连通性与功率传输指标,量化极端天气下巴西的配电网弹性。此外,部分学者结合潮流分析与介电常数对配电网网架结构展开进一步研究,文献[45]运用拓扑脆弱性分析将节点失效概率与供电能力结合,提出了评估模型。配电网接入分布式电源后其结构必然发生变化,部分学者考虑构建含分布式电源的配电网关键节点辨识与网架整体评估模型,实现配电网设备与网架融合的评估思路<sup>[45-46]</sup>。上述方法均运用复杂网络相关知识,将网架结构抗毁性纳入考虑范围,对配电网结构弹性展开定量计算,但未考虑网络中各节点的连锁故障。

随着配电网感知设备与通信设备的广泛接入,其逐渐成为一个典型的信息物理系统,单纯衡量配电网物理拓扑难以全面描述配电网结构弹性。文献[47]提出了一种级联模型,最大限度地提高了不同网络级联故障的鲁棒性。文献[48]搭建了网络攻击在信息-物理网络间的传递模型,并以此作为评价电网弹性的关键指标。文献[49]运用复杂网络理论分析了智能电网信息物理系统,结合网络聚类系数、平均度、平均路径长度等复杂网络概念评价电网抵御网络攻击能力。上述文献将电网抽象为信息拓扑与网架拓扑,运用复杂网络理论定量分析配电网结构弹性。但是,搭建的配电网信息物理系统复杂网络模型较粗糙,难以完全符合实际情况。

配电网结构弹性主要运用概率学与复杂网络理论,从静态角度衡量节点、拓扑、系统的可靠性,间接展开对配电网弹性的量度。但是,概率学难以把握整体趋势,而复杂网络理论无法满足特定运行状态的精确模拟。因此,如何构建更贴近实际的配电网结构弹性指标仍有待进一步研究。

### 2.2 配电网系统弹性指标

配电网弹性研究除了抵御冲击外,还须承受扰动,并可能恢复至稳定状态。因此,系统弹性指标从动态角度出发,定量计算配电网遭受扰动后的响应过程。配电网遭受扰动后的系统功能曲线如附录B图B1所示。

部分学者对系统响应过程进行精细划分,得出

符合特定场景的指标。文献[50]针对冰灾场景,将鲁棒性进行细化,提出了失负荷率指标;对灾中、灾后时间进行细化,提出了详细描述配电网响应时间指标。文献[51]在如附录B图B1所示的弹性梯形响应曲线基础上,细化了系统受损面积、受损速度、恢复情况以及恢复速度等系统弹性指标。

考虑到配电网含有海量资源,其系统弹性指标还需要考虑灾后资源冗余性和可调度能力。文献[52]从灾后资源冗余性出发,提出了柴油、电池、电动公共汽车等发电资源在飓风后的配电系统分配方案,用以衡量配电网系统弹性。文献[53-54]将分布式电源和微电网作为灾后重要资源,结合配电网运行方式的改变,提出了系统弹性指标定量分析配电网弹性。文献[14]在考虑灾害全过程基础上,将通信资源影响纳入配电网弹性评价关键指标。

配电网内的海量资源时空深度耦合特性<sup>[55]</sup>可以放大微小的波动,造成不利影响,因此,不确定性波动对配电网影响及恢复控制过程也是系统弹性指标需要衡量的范畴。如附录B图B1所示,内部波动时弹性响应曲线 $T_{in}$ 的定量计算同样可以纳入系统弹性指标范畴。与外部冲击时的弹性响应曲线 $T_{out}$ 相比, $T_{in}$ 的鲁棒性体现在电压波动<sup>[56]</sup>而非失负荷。

不同文献基于动态角度提出的配电网系统弹性指标如表1所示。

表1 基于动态角度的配电网系统弹性指标文献列表  
Table 1 Reference list of system resilience indices of distribution network based on dynamic perspective

系统弹性性能	详细指标	参考文献
鲁棒性	失负荷率	[5, 50-53]
	负荷恢复能力	[3, 5, 50-53, 57]
	电压波动情况	[37, 56]
快速性	失负荷速度	[50-51]
	响应时间	[5, 35, 50]
	恢复时间	[3, 5, 34, 51-53, 57]
冗余性	应急发电资源	[21, 52-54]
	其他应急资源(检修、通信等)	[3, 14, 36]

从表1可知,配电网系统弹性指标是多类评价的综合<sup>[58]</sup>,如何构建一个全面评价指标体系仍有待进一步研究。

### 3 含海量资源配电网弹性研究技术路线

本章梳理了配电网扰动因素,提出综合考虑不同扰动的配电网弹性研究框架,对框架涉及的数据基础、理论支撑与弹性提升技术、工程应用展开详细阐述。

#### 3.1 扰动划分

现有配电网弹性研究大多沿用大电网弹性的概念,即聚焦于极端自然灾害下电网的恢复能力<sup>[59]</sup>。随着海量资源的接入,配电网内部波动不可忽视,因此,文章重新整理划分配电网扰动因素如附录A表A2所示。

由附录A表A2可知,外部冲击时<sup>[60-62]</sup>,配电网由于设施损坏或失灵导致停电;内部波动时<sup>[63-69]</sup>,配电网内资源深度耦合,源网荷储任意侧的不确定性波动都可能造成系统连锁反应,极端情况可能导致功率失衡等连锁故障(如分布式发电大规模脱网<sup>[70]</sup>、电动汽车负荷高峰期规模化充电导致局部阻塞<sup>[71]</sup>等)。

#### 3.2 配电网弹性研究框架

外部冲击时,配电网弹性研究侧重于灾前辨识与加固关键设备、灾后应急资源合理调配;内部波动时,配电网弹性研究侧重于资源时间-空间协同调度,两者区别明显。因此,本文以扰动作为区分,搭建含海量资源配电网弹性研究框架如附录B图B2所示。其中,数据基础将现有数据整合,涉及数据规范、数据处理与存储等方面挑战;理论支撑与弹性提升技术涉及配电网结构弹性和系统弹性提升;工程应用涉及运行、应急、灾害场景。

#### 3.3 数据基础

数据作为提升配电网弹性的基石,具有举足轻重的作用。随着海量资源的接入,数据呈现出体量大、类型多、增长快的大数据特征<sup>[72]</sup>;分布式电源、储能、充电桩等均有独立监测系统,使得配电网弹性研究的数据来源格式迥异,数据之间的关联复杂、孤岛化严重,给数据整合、挖掘带来较大困难<sup>[73]</sup>。

针对上述数据问题,首先考虑从根源上解决,即统一系统数据标准。文献[74]介绍了国家电网有限公司针对多源异构系统数据提出的数据源端统一规范,采用面向对象的方式,以设备为标识,确保信息标准化接入。文献[75-76]详细规定了电网设备全路径名称规范与编码方式。文献[77]在此基础上提出了全过程数据处理技术,利用业务标签强化数据集集成到交付全过程特征。通过统一系统接入规范,保证数据质量,能较好地解决增量系统数据问题,但难以对存量系统数据进行处理。

针对存量系统数据的处理问题,已有研究考虑提取各系统数据并重新储存的技术路线。文献[78]针对调度端数据文本保存特点,提出了将调度端模型提取并转存至大数据平台的思路,但研究限于结构化数据,未对非结构化数据展开研究。文献[79]基于Hadoop大数据平台提出了配用电数据的哈希

分桶存储算法,实现配电网数据关联与集中存储。上述方法通过数据提取与转存,较好地解决了不同系统数据异构问题,结合大数据平台架构<sup>[80]</sup>,为后续弹性研究打下了坚实的数据基础。

### 3.4 理论支撑与弹性提升技术

#### 3.4.1 外部冲击时的配电网弹性理论研究与提升技术

极端灾害大多会造成配电网一次设备的损伤;网络攻击则是通过影响二次设备扩散至一次设备,造成其拒动、误动,两者本质上均是关键位置设备故障引发的停电。因此,外部冲击时,含海量资源配电网弹性理论研究首先需要建立数学模型研究其结构弹性,达到灾前辨识与加固关键设备的目的。

含海量资源配电网建模主要分为两大类:第1类为特定研究对象详尽建模;第2类为整体思维下配电网抽象建模。第1类建模能较好地描述研究对象的行为特征,文献[81-83]对配电网分布式电源(风电、光伏发电)、汽轮机、燃料电池与储能装置、可控负荷进行了数学建模,能精准描述上述对象在某方面的行为。但是配电网资源日渐复杂,逐一详细建模的方法难以全面揭示其整体的动态行为特征。事实上,含海量资源的配电网数学模型呈现高维、非凸、非线性的特点<sup>[84]</sup>,传统电力系统分析方法难以适用。第2类建模一般采用复杂网络理论,从整体上把握系统特性与网络响应的动力学特性,文献[85-87]分别构建了配电网复杂网络加权模型、网架抗毁模型与含分布式电源和储能系统的配电网连通性模型,挖掘系统物理结构脆弱性。

随着信息技术的大规模推广,含海量资源的配电网信息物理耦合特征明显,其模型需要描述信息-物理网络融合后的整体情况,复杂网络理论优势更为显著。文献[88-91]考虑了电力信息物理网络在相互依存基础上,运用复杂网络理论对配电网脆弱性、信息传输延时等进行评估,并提出了加固策略。针对外部网络攻击在信息物理网络传染性强的特点,部分学者考虑将电力信息物理系统各类网络攻击抽象为攻击图顶点,运用复杂网络理论搭建跨空间连锁故障的数学模型<sup>[92-93]</sup>。

由于外部冲击为小概率-高损失的极端事件,在防灾阶段加固薄弱环节之余,配电网弹性的提升更重要的是通过减灾阶段的应急资源调度提升其系统弹性。应急资源分为发电资源和非发电资源。前者优先考虑分布式电源<sup>[5]</sup>(风电、光伏发电),但分布式电源不具备调频特性,且输出功率具有较强的不确定性,须辅以储能装置<sup>[94]</sup>、柔性直流配电系统<sup>[95]</sup>进行协同调度或形成微电网<sup>[96]</sup>。对于受灾严重且需

要及时供电的重要负荷,优先考虑可移动发电资源,文献[97-99]将应急发电车、车载移动储能系统和电动车辆纳入配电网灾后应急调度资源,结合配电网、交通网与抢修团队耦合关系搭建了抢修模型,实现了快速恢复供电。非发电资源调度主要包括配电网重构和维修资源调度,其中,配电网重构需要结合灾后电源情况与负荷特点进行多目标寻优<sup>[100-101]</sup>,得到最优方案;维修资源调度需要结合资源位置、抢修对象和网架结构,构建混合整数线性模型,以最小维修时间和最大负荷恢复为寻优目标,得到最佳抢修方案<sup>[52]</sup>。

#### 3.4.2 内部波动时的配电网弹性理论研究与提升技术

配电网源荷不确定性难以避免,可以通过电网内部资源协同控制缓解,而这一切要建立在在对系统状态感知与预警的基础上。因此,内部波动时的配电网弹性理论研究首先需要挖掘已有信息、建立感知模型,达到辨识波动、预警风险的目的。

文献[102]利用同步相量测量装置的数据建立配电网感知模型,提出了配电网波动的安全态势预警指标。文献[103]考虑光伏、储能装置,建立了配电网量测函数及雅可比矩阵,提高了状态感知精度。但由于配电网量测系统建设缓慢,提供的数据有限,需要充分利用各类数据进行综合判断。文献[104-105]利用历史信息、气象信息与实时量测数据,对配电网资源不确定性进行了建模与预警。

在配电网状态感知与预警基础上,内部波动时的弹性提升技术侧重于源网荷储协同控制。配电网不确定性波动主要集中于电源端与负荷侧,可通过源源互补<sup>[106-108]</sup>和源荷互动<sup>[109-110]</sup>解决。源源互补的核心在于利用不同电源出力时序性差异,文献[106]利用光伏发电、风电等电源时空范围内的差异性进行协同控制,实现最优运行。储能装置能实时跟踪分布式电源的出力,常与电源侧互补,用以平抑波动,如风储混合、光储混合、风光储混合等<sup>[107-108]</sup>。源荷互动的核心在于利用负荷需求响应平抑波动,文献[109-110]将源荷不确定性同时纳入考虑,提出了激励型需求响应机制,增强了互动能力。此外,直流配电网相关研究表明:交直流混合配电网<sup>[95]</sup>结合储能装置能有效平抑可再生能源波动;柔性开关技术<sup>[111]</sup>能有效改善馈线功率失衡和电压波动,提高配电网弹性。

随着电动汽车的规模化接入,配电网负荷分布的时空差异日益明显,负荷高峰期峰值问题日趋严峻,易造成局部阻塞,因此,内部波动时的配电网弹性提升技术还需要缓解输电阻塞问题。文献[112-

113]运用动态热定值(dynamic thermal rating, DTR)技术实现了分布式电源接入后的变压器、线路短期动态增容。文献[114]研究高压配电网转供逻辑,构建了阻塞控制模型,给高峰阻塞或功率缺额等紧急场景的调度提供了支持。上述文献分别从元件层面与网架层面缓解局部阻塞,提高了配电网弹性。

### 3.5 工程应用

前文所述理论侧重于提升结构弹性或系统弹性的某些方面,但在实际工程中,静态结构弹性与动态系统弹性难以分割:一方面,系统动态响应过程中必须考虑结构薄弱环节,结合网架实现资源最优调度;另一方面,配电网静态结构弹性研究过程中必须考虑海量资源的时空灵活性。因此,在工程应用中需要以运行、紧急和灾害为场景,综合考虑结构弹性与系统弹性的提升,应用详情如附录B图B2所示。

文献中涉及配电网弹性提升技术的典型示范工程如表2所示。

表2 弹性提升技术典型示范工程  
Table 2 Typical demonstration project of resilience enhancement technology

示范工程名称	应用技术	效果
天津市中新生态城示范项目 <sup>[115]</sup>	配电网综合调度技术	实现不同分布式能源的优势互补及快速响应
佛山市金融高新区示范工程 <sup>[116]</sup>	配电网安全风险评估	调度员可判别系统实时风险,给出正常、警戒、紧急域相关操作建议
Esfahan Regional Power Network <sup>[117]</sup>	动态增容技术	避免减载17%
北京市延庆区八达岭经济开发区 <sup>[118]</sup>	柔性配电网转供技术	实现馈线最大能力供电及负载均衡
广西壮族自治区猫儿山 <sup>[119]</sup>	灾后资源调度(多微电网调度)	减少停电损失(折算成效益平均提升率为46.84%)
某城市局部高压配电系统 <sup>[120]</sup>	配电网重构技术	减少开关动作次数,提高配电网安全裕度

由表2可知,众多示范工程中涉及部分配电网弹性提升技术,但是关于高弹性综合能源配电网示范工程方面还有待进一步研究。

## 4 新型电力系统背景下的配电网弹性研究展望

2021年,中央财经委员会第九次会议提出构建以新能源为主体的新型电力系统。配电网必将形成源网荷储多要素互动、多能源主体耦合的开放包容系统。此外,配电网与交通、通信等非能源关键基础设施的时空交互和多社会主体协同决策、联合控制

将导致系统中各社会主体运行时序特征与行为特征混杂,任何波动都可能产生蝴蝶效应<sup>[121]</sup>;同时,外界极端事件频发易导致上述多个系统连锁故障,甚至造成跨域传播。鉴于此,含海量资源的高弹性配电网研究势在必行,有利于配电网自身、配电网与其他能源主体、配电网与非能源主体的协同优化。

### 4.1 云边协同技术

随着海量资源接入配电网,数据涌现、延迟响应等问题日益显著,现行的集中处理方式受到巨大挑战<sup>[122]</sup>。此外,配电网与其他能源主体甚至非能源主体的深度耦合对数据共享模式与计算架构也提出新的要求。

云边协同技术<sup>[123]</sup>强调建立自感知分布式边缘处理“神经”与核心调度“大脑”,运用边缘计算<sup>[124]</sup>、雾计算<sup>[125]</sup>等模式就地解决次要问题,将核心数据加密上传并集中处理,缓解云端数据压力、提高处理速度。其典型结构如图2所示。

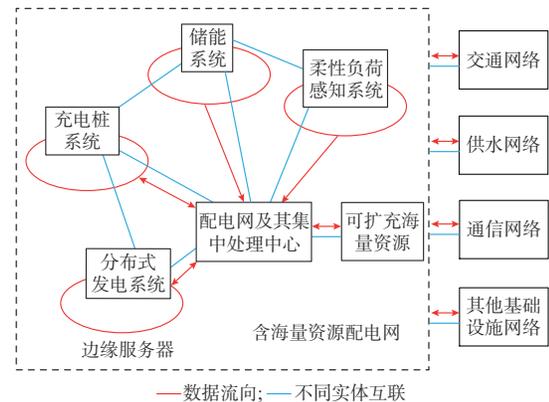


图2 基于云边协同的含海量资源配电网结构框图  
Fig. 2 Structural block diagram of distribution network with massive resources based on cloud-edge collaboration

从数据角度来看,云边协同配电系统将资源状态感知信息下放至边缘服务器预处理,减缓了主站压力。通过约定不同能源主体关键信息的上传模式,解决了数据异构问题,提高了配电系统协同调度效率。此外,配电网与非能源关键基础设施系统之间通过云边协同,可以打破利益主体之间的信息壁垒,保证协同控制,为高弹性配电网奠定基础。

从安全角度看,未来配电网必然与第三方主体深度耦合,涌现出许多开放信息环境的主体接入(如互联网、物联网),它们更容易暴露在恶意网络攻击之下。配电网传统集中控制模式易导致一条“开放网络一对应控制主体—集中控制中心—功率扰动—电网安全”的跨信息物理空间攻击路径。云边协同技术可以在边缘服务器先行处理相关数据,对异常

数据根据历史情况进行识别校验,及时切断恶意注入等网络攻击手段,提高配电网抵御网络风险能力。

目前,云边协同技术在配电网的运用局限于配电网设备状态感知<sup>[126]</sup>,对于不同能源主体之间的云边协同技术尚未展开详细研究。此外,云边协同作为一种新的数据共享模式与计算架构,可扩展至配电系统与其他非能源社会主体之间。如何构建配电网与其他主体之间的云边协同系统也是未来研究的重点。

## 4.2 综合控制技术

随着海量资源接入配电网,系统控制复杂程度陡增,控制过程需要综合考虑“时空-安全-经济”多重目标。如何实现电网内部海量资源综合控制,使上述资源形成聚合效应,达到分层协同、智能友好,从而支撑配电网常态化最优运行及灾害下快速响应,需要进一步考虑。

狭义综合控制指的是配电网源网荷储协同控制,已形成较多研究成果,但多能源系统之间的横向协调控制技术尚停留在风光储等电力能源之间。冷、热、电、气异质系统<sup>[127]</sup>之间非线性、不确定性相互影响的研究仍处于起步阶段,尤其是多能源系统之间如何通过异质元件<sup>[128]</sup>传递转换信息和能量过程等需要进一步建模分析。因此,建立多能源系统异质元件耦合模型,提出时空尺度配合的综合控制技术是提高配电网弹性的重要途径。

此外,配电网作为基础设施之一,未来与城市交通、供水、通信等基础设施通过服务在多维时空交叠,形成多重覆盖、相互协调的基础设施网络<sup>[129]</sup>。因此,广义综合控制涉及电力与其余非能源主体的协同优化和平抑内部波动。配电网作为其他基础设施能源的供给方,其影响力最大,提出考虑跨域互联的配电网综合控制技术,确保各主体协同优化,也是未来高弹性配电网的研究重点。

最后,广义综合控制还需要考虑遭受外部冲击时,配电网与其他非能源主体的深度耦合特性,即外界冲击某些子系统,故障会在相关系统之间蔓延并相互影响<sup>[130]</sup>。因此,探究外部冲击在耦合系统之间的传播机理,优化配电网与其他非能源系统的耦合机制,提出协同恢复控制技术,也是未来配电网弹性的研究方向之一。

## 5 结语

含海量资源高弹性配电网是能源-信息-社会多网耦合的产物,其作为分布式电源、柔性负荷、储能设备、可移动应急资源汇聚区,具备资源高利用率、扰动高承载以及快速恢复能力,也是充分考虑辖区

内资源、设备时空深度耦合且灵活互补的重要基础设施。在此目标下,文章搭建考虑不确定性扰动的配电网弹性研究框架,对研究所需数据基础、理论支撑及弹性提升技术、应用场景进行了梳理,对高弹性配电网发展趋势进行了展望。随着新型电力系统的提出与推广,未来配电网的不确定性扰动大增,分析不确定性扰动影响、探求不确定性扰动下配电网综合控制技术、提高配电网弹性能力等还有待进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [3] 唐文虎,杨毅豪,李雅晶,等.极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2244-2254.  
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254.
- [4] 杨飞生,汪璟,潘泉,等.网络攻击下信息物理融合电力系统的弹性事件触发控制[J].自动化学报,2019,45(1):110-119.  
YANG Feisheng, WANG Jing, PAN Quan, et al. Resilient event-triggered control of grid cyber-physical systems against cyber attack [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 110-119.
- [5] 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.
- [6] GALLEGRO L A, PADILHA-FELTRIN A. Power flow for primary distribution networks considering uncertainty in demand and user connection [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 1171-1178.
- [7] LIU J, ZHOU Y, LI Y, et al. Modeling and analysis considering the time series characteristics for distribution network with high penetration of renewable energy [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(14): 2800-2809.
- [8] MEI F, ZHANG J T, LU J X, et al. Stochastic optimal operation model for a distributed integrated energy system based on multiple-scenario simulations [J]. Energy, 2021, 219: 119629.

- [9] 陆晓,徐春雷,冷钊莹,等.基于数据驱动方法的疫情阶段电力用户负荷特性画像模型[J].电力建设,2021,42(2):93-106.  
LU Xiao, XU Chunlei, LENG Zhaoying, et al. Load characteristic portrait model of power users in epidemic stage applying data-driven method [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 93-106.
- [10] 刘鑫蕊,吴泽群.面向智能电网的空间隐蔽型恶性数据注入攻击在线防御研究[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2546-2559.  
LIU Xinrui, WU Zequn. Online defense research of spatial-hidden malicious data injection attacks in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2546-2559.
- [11] 中电传媒能源情报研究中心.中国能源大数据报告(2021年):电力篇[R/OL].[2021-09-05].<https://news.bjx.com.cn/html/20210617/1158638.shtml>.  
China Power Media Group Energy Intelligence Research Center. China energy big data report (2021): electricity [R/OL]. [2021-09-05]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210617/1158638.shtml>.
- [12] GREEN R C, WANG L F, ALAM M. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 544-553.
- [13] 陈彬,于继来.考虑通信影响的配网恢复力评估及提升措施研究[J].电网技术,2019,43(7):2314-2320.  
CHEN Bin, YU Jilai. Research on resilience assessment and improvement measures of distribution network considering the influence of communication system [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2314-2320.
- [14] 孙江玉,刘创,欧阳敏,等.地震灾害下电网性能研究综述——以弹性视角为主[J].自然灾害学报,2018,27(2):14-23.  
SUN Jiangyu, LIU Chuang, OUYANG Min, et al. Review of performance studies on electric power grids under seismic hazards—with a focus on resilience perspective [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 14-23.
- [15] MIN O Y, ZHAO L J, PAN Z Z, et al. Comparisons of complex network based models and direct current power flow model to analyze power grid vulnerability under intentional attacks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 403: 45-53.
- [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] 周孝信.双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析[EB/OL].[2021-09-05].<http://www.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20210525/75980.html>.  
ZHOU Xiaoxin. Scenario analysis of China's energy and power system development under the dual carbon targets [EB/OL]. [2021-09-05]. <http://www.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20210525/75980.html>.
- [18] 李宇泽,周念成,侯健生,等.计及光伏发电低电压穿越不确定性的主动配电网短路电流概率评估[J].电工技术学报,2020,35(3):564-576.  
LI Yuze, ZHOU Niancheng, HOU Jiansheng, et al. Probabilistic evaluation of short-circuit currents in active distribution grids considering low voltage ride-through uncertainty of photovoltaic [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 564-576.
- [19] 王颖,文福拴,赵波,等.高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1200-1206.  
WANG Ying, WEN Fushuan, ZHAO Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206.
- [20] 李博,孙建军,余攀,等.基于负荷聚类与网络等效的配电网多维典型场景生成方法[J].中国电机工程学报,2021,41(8):2661-2671.  
LI Bo, SUN Jianjun, YU Pan, et al. A multi-dimensional typical scenarios generation algorithm for distribution network based on load clustering and network structure equivalence [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2661-2671.
- [21] 李琳,穆云飞,殷自力,等.基于台风场景模拟的配电网架空线路薄弱环节辨识方法[J].电力自动化设备,2020,40(5):150-157.  
LI Lin, MU Yunfei, YIN Zili, et al. Identification method of weak links of overhead lines in distribution network based on typhoon scenario simulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 150-157.
- [22] ALVAREZ D L, RIVERA S R, MOMBELLO E E. Transformer thermal capacity estimation and prediction using dynamic rating monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1695-1705.
- [23] 张勇军,刘子文,宋伟伟,等.直流配电系统的组网技术及其应用[J].电力系统自动化,2019,43(23):39-49.  
ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, SONG Weiwei, et al. Networking technology and its application of DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 39-49.
- [24] 武昕,于金莹,彭林,等.基于用户边缘侧事件解析的工业电力负荷非侵入式感知辨识[J].电力系统自动化,2021,45(4):29-37.  
WU Xin, YU Jinying, PENG Lin, et al. Non-intrusive perception and identification of industrial power load based on analysis of event on user edge [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 29-37.
- [25] 葛少云,李吉峰,刘洪,等.考虑物理特征与行为因素的家庭用能特性建模[J].电力自动化设备,2019,39(3):36-44.  
GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, et al. Modelling of household energy consumption characteristics considering physical features and behavior factors [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 36-44.
- [26] 龙雪梅,杨军,吴赋章,等.考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J].电力系统自动化,2020,44(14):86-93.  
LONG Xuemei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Prediction of electric vehicle charging load considering interaction between road network and power grid and user's psychology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 86-93.
- [27] 张强,王禹霖,张茜.基于剩余容量匹配的储能装置负荷分配

- 控制技术[J].电力系统自动化,2020,44(24):126-133.
- ZHANG Qiang, WANG Yulin, ZHANG Qian. Load distribution control technology for energy storage device based on residual capacity matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 126-133.
- [28] 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.
- [29] 薛俞,李月乔,刘文霞,等.柔性互联配电系统连锁故障风险评估[J].电力系统自动化,2021,45(8):112-119.
- XUE Yu, LI Yueqiao, LIU Wenxia, et al. Risk assessment of cascading failures in flexible interconnected power distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 112-119.
- [30] 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[2021-09-05]. <https://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 [2021-09-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20210621.1630.010.html>.
- [31] 王珍意,黄文杰,赵川,等.含分布式电源的中压柔性直流配电网研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):102-108.
- WANG Zhenyi, HUANG Wenjie, ZHAO Chuan, et al. Research on flexible medium voltage DC distribution network with distributed generation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 102-108.
- [32] 吕军,栾文鹏,刘日亮,等.基于全面感知和软件定义的配电网物联网体系架构[J].电网技术,2018,42(10):3108-3115.
- LÜ Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution Internet of Things based on widespread sensing & software defined technology [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3115.
- [33] PEPPANEN J, RENO M J, THAKKAR M, et al. Leveraging AMI data for distribution system model calibration and situational awareness [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 2050-2059.
- [34] 刘健,张小庆,张志华.继电保护配合提高配电网自动化故障处理性能[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):10-16.
- LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16.
- [35] 吴悦华,高厚磊,徐彬,等.有源配电网分布式故障自愈方案与实现[J].电力系统自动化,2019,43(9):140-146.
- WU Yuehua, GAO Houlei, XU Bin, et al. Distributed fault self-healing scheme and its implementation for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 140-146.
- [36] 卢艺,戴月,马伟哲,等.含分布式电源和储能装置的配电网分散式动态最优潮流[J].电网技术,2019,43(2):434-444.
- LU Yi, DAI Yue, MA Weizhe, et al. Decentralized dynamic optimal power flow in distribution networks with distributed generation and energy storage devices [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 434-444.
- [37] 李翠萍,东哲民,李军徽,等.配电网分布式储能集群调压控制策略[J].电力系统自动化,2021,45(4):133-141.
- LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 133-141.
- [38] 郑国鑫,雷霞,王湘,等.地震灾害模拟及配电网的风险评估[J].电工技术学报,2020,35(24):5218-5226.
- ZHENG Guoxin, LEI Xia, WANG Xiang, et al. Earthquake simulation and risk assessment of distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(24): 5218-5226.
- [39] 尹积军,夏清.能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J].中国电机工程学报,2021,41(2):486-497.
- YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 486-497.
- [40] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2745.
- BIE Zhao hong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [41] NAJAFI TARI A, SEPASIAN M S, TOURANDAZ KENARI M. Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106414.
- [42] 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.
- [43] CIAPESSONI E, PITTO A, CIRIO D. An application of a risk-based methodology to anticipate critical situations due to extreme weather events in transmission and distribution grids [J]. Energies, 2021, 14(16): 4742.
- [44] 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.
- [45] CHEN X, QIU J, REEDMAN L, et al. A statistical risk assessment framework for distribution network resilience [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4773-4783.
- [46] 张稳,盛万兴,刘科研,等.高渗透率分布式电源按节点关键性接入配电网的运行风险评估[J].高电压技术,2021,47(3):937-947.
- ZHANG Wen, SHENG Wanxing, LIU Keyan, et al. Operation risk assessment of high penetration distributed generation connected to distribution network according to node

- criticality [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47 (3) : 937-947.
- [47] WANG J W, ZHANG C, HUANG Y, et al. Attack robustness of cascading model with node weight [J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 78(1): 37-48.
- [48] LIU Z X, WANG L F. Leveraging network topology optimization to strengthen power grid resilience against cyber-physical attacks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1552-1564.
- [49] 董威, 李永刚. 基于复杂网络的智能电网网络攻击影响分析研究 [J]. 信息安全, 2020, 20(1): 52-60.  
DONG Wei, LI Yonggang. Research on analysis of attacks on smart grid network based on complex network [J]. Netinfo Security, 2020, 20(1): 52-60.
- [50] 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.
- [51] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Power systems resilience assessment: hardening and smart operational enhancement strategies [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1202-1213.
- [52] GAO H X, CHEN Y, MEI S W, et al. Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1214-1233.
- [53] WANG H K, WANG S X, YU L, et al. A novel planning-attack-reconfiguration method for enhancing resilience of distribution systems considering the whole process of resiliency [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(2): 1-17.
- [54] 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.
- [55] 韦晓广, 高仕斌, 臧天磊, 等. 社会能源互联网: 概念、架构和展望 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4969-4986.  
WEI Xiaoguang, GAO Shibin, ZANG Tianlei, et al. Social energy Internet: concept, architecture and outlook [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4969-4986.
- [56] 陈鹏伟, 陶顺, 肖湘宁, 等. 配电网电压不确定水平弹性网分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4650-4661.  
CHEN Pengwei, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. A method to analyze the voltage levels of uncertainty in distribution network with elastic net [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4650-4661.
- [57] 肖智文, 王国庆, 朱建明, 等. 面向突发事件的电网韧性能力评价及构建方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(10): 2637-2645.  
XIAO Zhiwen, WANG Guoqing, ZHU Jianming, et al. Method for assessing and constructing power system resilience under emergency events [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(10): 2637-2645.
- [58] 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.
- [59] ZHAO Y X, LIU S Y, LIN Z Z, et al. Identification of critical lines for enhancing disaster resilience of power systems with renewables based on complex network theory [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14 (20) : 4459-4467.
- [60] 卢志刚, 李丹, 吕雪姣, 等. 含分布式电源的冰灾下配电网多故障抢修策略 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 423-432.  
LU Zhigang, LI Dan, LÜ Xuejiao, et al. Multiple faults repair strategy under ice storm for distribution network with distributed generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 423-432.
- [61] 苏盛, 李志强, 谷科, 等. 基于云安全的高级计量体系恶意软件检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 134-138.  
SU Sheng, LI Zhiqiang, GU Ke, et al. Cloud security based malware detection in advanced metering infrastructure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 134-138.
- [62] 陈刘东, 刘念. 面向互动需求响应的虚假数据注入攻击及其检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 15-23.  
CHEN Liudong, LIU Nian. False data injection attack and its detection method for interactive demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 15-23.
- [63] IKEGAMI T, URABE C T, SAITOU T, et al. Numerical definitions of wind power output fluctuations for power system operations [J]. Renewable Energy, 2018, 115: 6-15.
- [64] 王守相, 刘琪, 赵倩宇, 等. 配电网弹性内涵分析与研究展望 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 1-9.  
WANG Shouxiang, LIU Qi, ZHAO Qianyu, et al. Connotation analysis and prospect of distribution network elasticity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (9): 1-9.
- [65] 孙建军, 张世泽, 曾梦迪, 等. 考虑分时电价的主动配电网柔性负荷多目标优化控制 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 401-412.  
SUN Jianjun, ZHANG Shize, ZENG Mengdi, et al. Multi-objective optimal control for flexible load in active distribution network considering time-of-use tariff [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 401-412.
- [66] 刘云栋, 徐习东, 裘鹏, 等. 基于配电网过载风险的柔性多状态开关容量优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3418-3429.  
LIU Yundong, XU Xidong, QIU Peng, et al. Optimal capacity allocation of flexible multi-state switch based on overload risk of distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (11): 3418-3429.
- [67] 刘志文, 董旭柱, 吴争荣, 等. 考虑灵活定义约束的配电网检修计划双层优化方法 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2208-2216.  
LIU Zhiwen, DONG Xuzhu, WU Zhengrong, et al. A bi-level

- optimization method for distribution network maintenance schedule considering flexible definition constraint condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2208-2216.
- [68] CAO C, CHEN B. Generalized Nash equilibrium problem based electric vehicle charging management in distribution networks[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(15): 4584-4596.
- [69] WANG L, LV S X, ZENG Y R. Effective sparse adaboost method with ESN and FOA for industrial electricity consumption forecasting in China [J]. Energy, 2018, 155: 1013-1031.
- [70] 蒋子维,吴峰.主动配电网低压分布式光伏连锁故障分析[J].供用电,2021,38(4):77-84.  
JIANG Ziwei, WU Feng. Analysis of low voltage distributed photovoltaic cascading failure in active distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(4): 77-84.
- [71] 袁泉,汤奕.基于路-电耦合网络的电动汽车需求响应技术[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1627-1637.  
YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle demand response technology based on traffic-grid coupling networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1627-1637.
- [72] 薛禹胜,赖业宁.大能源思维与大数据思维的融合:(一)大数据与电力大数据[J].电力系统自动化,2016,40(1):1-8.  
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking: Part one big data and power big data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 1-8.
- [73] 刘科研,盛万兴,张东霞,等.智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J].中国电机工程学报,2015,35(2):287-293.  
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHANG Dongxia, et al. Big data application requirements and scenario analysis in smart distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 287-293.
- [74] 冷喜武,陈国平,蒋宇,等.智能电网监控运行大数据分析系统的数据规范和数据处理[J].电力系统自动化,2018,42(19): 169-176.  
LENG Xiwu, CHEN Guoping, JIANG Yu, et al. Data specification and processing in big-data analysis system for monitoring and operation of smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 169-176.
- [75] 国家能源局.电网设备通用数据模型命名规范:DL/T 1171—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.  
National Energy Administration. Power grid equipment common model naming specification: DL/T 1171—2012 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [76] 国家能源局.电能信息采集与管理系统第4-5部分:通信协议——面向对象的数据交换协议:DL/T 698.45—2017[S].北京:中国电力出版社,2017.  
National Energy Administration. Data acquisition and management system for electrical energy Part 4-5: communication protocol—object oriented data exchange protocol: DL/T 698.45—2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [77] 冷喜武,陈国平,蒋宇,等.智能电网监控运行大数据分析系统的数据规范和数据处理[J].电力系统自动化,2018,42(19): 169-176.  
LENG Xiwu, CHEN Guoping, JIANG Yu, et al. Data specification and processing in big-data analysis system for monitoring and operation of smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 169-176.
- [78] 赵林,张令涛,马仲佳,等.基于大数据技术调度端电网模型管理和分析架构[J].电网技术,2017,41(12):3750-3756.  
ZHAO Lin, ZHANG Lingtao, MA Zhongjia, et al. Management and analysis framework of power grid models based on big data technology in dispatching center [J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3750-3756.
- [79] 王林童,赵腾,张焰,等.配用电大数据多源集成及存储优化方法[J].高电压技术,2018,44(4):1131-1139.  
WANG Lintong, ZHAO Teng, ZHANG Yan, et al. Multi-source integration and storage optimization method for big data of power distribution and utilization [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1131-1139.
- [80] 彭小圣,邓迪元,程时杰,等.面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(3):503-511.  
PENG Xiaosheng, DENG Diyu, CHENG Shijie, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.
- [81] 周家南,苏宏升.计及负荷电压静特性的含分布式电源的前推回代潮流计算[J].电力系统保护与控制,2015,43(24):26-32.  
ZHOU Jianan, SU Hongsheng. Back/forward sweep power flow calculation with distributed generation considering static load characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 26-32.
- [82] 屈星,李欣然,盛义发,等.考虑电池储能系统的配电网广义综合负荷建模[J].高电压技术,2020,46(2):490-501.  
QU Xing, LI Xinran, SHENG Yifa, et al. Generalized composite load mode of distribution network considering battery energy storage system [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 490-501.
- [83] 陈鹏伟,陶顺,肖湘宁,等.主动配电网可靠性评估源荷模型改进及并行处理[J].电力系统自动化,2016,40(18):68-75.  
CHEN Pengwei, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Source-load model improvement and parallel computing for reliability evaluation of active distributed networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 68-75.
- [84] 林丹,刘前进,曾广璇,等.配电网信息物理系统可靠性的精细化建模与评估[J].电力系统自动化,2021,45(3):92-101.  
LIN Dan, LIU Qianjin, ZENG Guangxuan, et al. Refined modeling and evaluation of reliability for cyber-physical system of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 92-101.
- [85] 吴辉,彭敏放,张海艳,等.基于复杂网络理论的配电网节点脆弱度评估[J].复杂系统与复杂性科学,2017,14(1):38-45.  
WU Hui, PENG Minfang, ZHANG Haiyan, et al. Node vulnerability assessment for distribution network based on complex network theory [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(1): 38-45.
- [86] 杨丽徒,林茂盛,张宏伟,等.中压配电网典型网络结构抗毁性评估[J].电力系统自动化,2012,36(1):28-31.  
YANG Lixi, LIN Maosheng, ZHANG Hongwei, et al.

- Inulnerability evaluation of typical network structures for medium voltage distribution networks [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(1): 28-31.
- [87] XUE F, XU Y Y, ZHU H Y, et al. Structural evaluation for distribution networks with distributed generation based on complex network[J]. *Complexity*, 2017, 2017: 7539089.
- [88] 冀星沛,王波,董朝阳,等. 电力信息-物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. *电网技术*, 2016, 40(6): 1867-1873.  
JI Xingpei, WANG Bo, DONG Zhaoyang, et al. Vulnerability evaluation and link addition protection strategy research of electrical cyber-physical interdependent networks [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(6): 1867-1873.
- [89] SUN X, LIU Y L, DENG L C. Reliability assessment of cyber-physical distribution network based on the fault tree [J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 1411-1424.
- [90] 邓良辰,刘艳丽,余贻鑫,等. 考虑故障处理全过程的配电网信息物理系统可靠性评估[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(12): 22-29.  
DENG Liangchen, LIU Yanli, YU Yixin, et al. Reliability assessment of distribution network CPS considering whole fault processing [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(12): 22-29.
- [91] 刘文霞,宫琦,郭经,等. 基于混合通信网的主动配电信息物理系统可靠性评价[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(6): 1706-1718.  
LIU Wenxia, GONG Qi, GUO Jing, et al. Reliability simulation of ADN cyber-physical system based on hybrid communication network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(6): 1706-1718.
- [92] 王宇飞,高昆仑,赵婷,等. 基于改进攻击图的电力信息物理系统跨空间连锁故障危害评估[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(6): 1490-1499.  
WANG Yufei, GAO Kunlun, ZHAO Ting, et al. Assessing the harmfulness of cascading failures across space in electric cyber-physical system based on improved attack graph [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1490-1499.
- [93] 李培恺,刘云,辛焕海,等. 分布式协同控制模式下配电网信息物理系统脆弱性评估[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(10): 22-29.  
LI Peikai, LIU Yun, XIN Huanhai, et al. Vulnerability assessment for cyber physical system of distribution network in distributed cooperative control mode [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(10): 22-29.
- [94] 葛少云,张成昊,刘洪,等. 考虑微能源网支撑作用的配电网弹性提升策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2306-2317.  
GE Shaoyun, ZHANG Chenghao, LIU Hong, et al. Resilience enhancement strategy for distribution network considering supporting role of micro energy grid [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2306-2317.
- [95] 姜淞瀚,彭克,徐丙垠,等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(5): 219-231.  
JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(5): 219-231.
- [96] 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.
- [97] PANG N S, LIU H, HUANG S Y, et al. Emergency rush repair task scheduling of distribution networks in large-scale blackouts [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 82: 373-381.
- [98] YANG Z J, DEHGHANIAN P, NAZEMI M. Seismic-resilient electric power distribution systems: harnessing the mobility of power sources [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2304-2313.
- [99] CHEN B Y, SHI Y M, CHEN Y N. A resilience enhancement model for complex distribution network coupling with human resources and traffic network [J]. *Complexity*, 2021, 2021: 2051719.
- [100] WANG Z Y, CHEN B K, WANG J H, et al. Networked microgrids for self-healing power systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 310-319.
- [101] 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.
- [102] 田书欣,李昆鹏,魏书荣,等. 基于同步相量测量装置的配电网安全态势感知方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 617-632.  
TIAN Shuxin, LI Kunpeng, WEI Shurong, et al. Security situation awareness approach for distribution network based on synchronous phasor measurement unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 617-632.
- [103] 方治,宋绍剑,林子彰,等. 含光伏电站和蓄电池储能系统的主动配电系统状态估计[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(13): 71-79.  
FANG Zhi, SONG Shaojian, LIN Yuzhang, et al. State estimation for active distribution systems incorporating photovoltaic plant and battery energy storage system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(13): 71-79.
- [104] 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.
- [105] 葛磊蛟,李元良,陈艳波,等. 智能配电网态势感知关键技术及实施效果评价[J]. *高电压技术*, 2021, 47(7): 2269-2280.  
GE Leijiao, LI Yuanliang, CHEN Yanbo, et al. Key technologies of situation awareness and implementation effectiveness evaluation in smart distribution network [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(7): 2269-2280.
- [106] 邓威,李欣然,李培强,等. 基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(6): 216-225.  
DENG Wei, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network [J]. *Transactions of*

- China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.
- [107] 高锋阳,袁成,李昭君,等.考虑风-光-荷时空相关性的分布式电源和广义储能联合规划[J].电力自动化设备,2021,41(6): 133-144.  
GAO Fengyang, YUAN Cheng, LI Zhaojun, et al. Joint planning of distributed generation and generalized energy storage considering spatial-temporal correlation of wind-photovoltaic-load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 133-144.
- [108] 李笑竹,王维庆,王海云,等.基于鲁棒优化的风光储联合发电系统储能配置策略[J].太阳能学报,2020,41(8):67-78.  
LI Xiaozhu, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Energy storage allocation strategy of wind-solar-storage combined system based on robust optimization[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(8): 67-78.
- [109] 孙宇军,王岩,王蓓蓓,等.考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法[J].电力系统自动化,2018,42(2): 106-113.  
SUN Yujun, WANG Yan, WANG Beibei, et al. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 106-113.
- [110] 赵冬梅,宋原,王云龙,等.考虑柔性负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型[J].电力系统自动化,2019,43(22): 21-30.  
ZHAO Dongmei, SONG Yuan, WANG Yunlong, et al. Coordinated scheduling model with multiple time scales considering response uncertainty of flexible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 21-30.
- [111] 吕知彼,裴雪军,王朝亮,等.基于柔性多状态开关的配电网电压波动越限抑制方法[J].电力系统自动化,2019,43(12): 150-157.  
LYU Zhibi, PEI Xuejun, WANG Chaoliang, et al. A voltage over-limit suppression method based on soft normally-open point in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 150-157.
- [112] LI Y X, WANG Y, CHEN Q X. Optimal dispatch with transformer dynamic thermal rating in ADNs incorporating high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1989-1999.
- [113] YANG J, BAI X F, STRICKLAND D, et al. Dynamic network rating for low carbon distribution network operation—a UK application [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 988-998.
- [114] 金勇,刘友波,刘俊勇,等.基于转供逻辑约束的城市电网运行阻塞控制模型[J].电力系统自动化,2016,40(23):77-85.  
JIN Yong, LIU Youbo, LIU Junyong, et al. Operation congestion management model for urban power grids based on load transfer logical constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 77-85.
- [115] 郑玉平,王丹,万灿,等.面向新型城镇的能源互联网关键技术及应用[J].电力系统自动化,2019,43(14):2-15.  
ZHENG Yuping, WANG Dan, WAN Can, et al. Key technology and application of energy Internet oriented to new-type towns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 2-15.
- [116] 黄翌,汪飒,谭阳红,等.基于健康度和重要度的配电网运行风险评估方法[J].电力自动化设备,2016,36(6):136-141.  
HUANG Zhao, WANG Feng, TAN Yanghong, et al. Operational risk assessment based on health and importance indexes for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 136-141.
- [117] MAHMOUDIAN ESFAHANI M, YOUSEFI G R. Real time congestion management in power systems considering quasi-dynamic thermal rating and congestion clearing time[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(2): 745-754.
- [118] 肖峻,刚发运,黄仁乐,等.柔性配电网的最大供电能力模型[J].电力系统自动化,2017,41(5):30-38.  
XIAO Jun, GANG Fayun, HUANG Renle, et al. Total supply capability model for flexible distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 30-38.
- [119] 姚维强,周健,时珊珊,等.基于合作博弈的多微电网系统灾后恢复决策模型[J].电工电能新技术,2021,40(3):32-38.  
YAO Weiqiang, ZHOU Jian, SHI Shanshan, et al. Decision-making model of restoration of multi-microgrid system after disaster based on cooperative game[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(3): 32-38.
- [120] 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.
- [121] 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.
- [122] 费思源.大数据技术在配电网中的应用综述[J].中国电机工程学报,2018,38(1):85-96.  
FEI Siyuan. Overview of application of big data technology in power distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 85-96.
- [123] 白昱阳,黄彦浩,陈思远,等.云边智能:电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J].自动化学报,2020,46(3):397-410.  
BAI Yuyang, HUANG Yanhao, CHEN Siyuan, et al. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 397-410.
- [124] LIU J J, GUO H Z, XIONG J Y, et al. Smart and resilient EV charging in SDN-enhanced vehicular edge computing networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(1): 217-228.
- [125] LIU J N, WENG J, YANG A J, et al. Enabling efficient and privacy-preserving aggregation communication and function

- query for fog computing-based smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 247-257.
- [126] 聂峥, 章坚民, 傅华渭. 配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 154-161.
- NIE Zheng, ZHANG Jianmin, FU Huawei. Key technologies and application scenario design for making distribution transformer terminal unit being a containerized edge node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 154-161.
- [127] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未來综合配电网形态展望[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.
- [128] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10.
- AI Qian, HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10.
- [129] KORKALI M, VENEMAN J G, TIVNAN B F, et al. Reducing cascading failure risk by increasing infrastructure network interdependence [EB/OL]. [2021-09-05]. <https://arxiv.org/pdf/1410.6836.pdf>.
- [130] 蒋文君, 刘润然, 范天龙, 等. 多层网络级联失效的预防和恢复策略概述[J]. 物理学报, 2020, 69(8): 088904.
- JIANG Wenjun, LIU Runran, FAN Tianlong, et al. Overview of precaution and recovery strategies for cascading failures in multilayer networks[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(8): 088904.
- 
- 苏译(1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 智能配电网与系统韧性等。E-mail: suyi201803@163.com
- Jiashen TEH(1987—), 男, 通信作者, 博士, 博士生导师, 主要研究方向: 系统可靠性、动态热定值、系统韧性等。E-mail: jiashenteh@usm.my
- 柏智(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 物联网技术与大数据在电网中应用。E-mail: 66719318@qq.com
- (编辑 杨松迎)

## Review of Research on Resilience of Distribution Network with Massive Resources Considering Uncertainty Disturbance

SU Yi<sup>1,2</sup>, Jiashen TEH<sup>1</sup>, BAI Zhi<sup>2</sup>, HU Changhua<sup>3</sup>, WU Fangrong<sup>4</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, University of Science Malaysia, Nibong Tebal 11800, Malaysia;

2. Hunan Key Laboratory of Smart City Energy Sensing and Edge Computing (Hunan City University), Yiyang 413000, China;

3. Zhongshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400, China;

4. Hunan Automotive Engineering Vocational College, Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** The access of massive distributed generators, microgrids, energy storage devices, and other flexible resources to the distribution network makes a resilient distribution network possible. However, the potential of these resources in cooperatively resisting external shocks and restoring the normal operation of the power grid needs to be further explored. The deep spatial-temporal coupling of massive resources makes its structure and control more and more complex in the distribution network. Fluctuations on any side of the source-grid-load can trigger chain failures and affect the safe operation of the distribution network. For this purpose, this paper proposes a resilience research framework for the distribution network with massive resources considering uncertainty disturbances. The framework incorporates resilience to external hazards and suppression of internal fluctuations into the research scope. Firstly, this paper expands the connotation of distribution network resilience, summarizes the existing flexible resources of distribution networks, proposes the structure of a highly resilient distribution network with massive resources, and analyzes its characteristics. Secondly, structural resilience indexes and system resilience indexes are proposed from static topology and dynamic response perspectives respectively to realize quantitative analysis. Then, the uncertainty disturbance is divided into external shocks and internal fluctuations. And the research framework of distribution network resilience is proposed. Its data foundation, theoretical support and resilience enhancement technology, and application scenarios are sorted out and discussed in detail. Finally, an outlook on the highly resilient distribution network with massive resources is presented.

This work is supported by Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2021JJ60024), Research Foundation of Education Department of Hunan Province of China (No. 20B316) and China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 032000HK42180007).

**Key words:** distribution network; novel power system; resilience; massive resources; energy storage; microgrid; disturbance; uncertainty

