第 52 卷 第 6 期：2609-2622　　高电压技术　　Vol.52, No.6: 2609-2622
2026 年 6 月 30 日　　High Voltage Engineering　　June 30, 2026
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251562

# 源网荷协同演进背景下城市电网形态研究综述及展望

许　寅[1]，黄　力[1]，王　颖[1]，缪雨函[1]，罗　稜[2]，黄晨宏[3]，颜华敏[3]，郑　真[3]
（1. 北京交通大学电气工程学院，北京 100044；2. 国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200437；
3. 国网上海市电力公司青浦供电公司，上海 201700）

**摘　要**：在源网荷多重演进驱动下，城市电网形态迎来重大变化与挑战，亟须深入研究形态演化机理，设计合理的形态演进路径，以适应超预期变化。首先，分析了城市电网现有形态及面临的挑战。其次，从电网形态分析方法、城市配电网形态优化方法和城市输电网形态优化方法 3 方面对现有研究进行了梳理总结。其中，电网形态分析方法层面，从电网统计特性分析、电网形态结构薄弱环节分析和形态演进分析 3 个层面展开论述；城市配电网形态优化方法层面，从基于网架结构优化、新元素引入和新供电形式 3 种电网形态局部优化方向进行阐述；城市输电网形态优化方法方面，从灵活资源配置和分区柔性互联两个方面进行总结梳理。最后，从理论方法和关键技术等方面对未来的电网形态发展方向进行了展望，以期为后续城市电网形态相关研究提供借鉴。
**关键词**：城市电网；形态优化；新型电力系统；分形；复杂网络理论；柔性互联

## A Review and Outlook on Urban Power Grid Morphology Under Source-grid-load Co-evolution

XU Yin[1], HUANG Li[1], WANG Ying[1], MIAO Yuhan[1], LUO Ling[2], HUANG Chenhong[3], YAN Huamin[3], ZHENG Zhen[3]
(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China;
3. State Grid Shanghai Qingpu Electric Power Supply Company, Shanghai 201700, China)

**Abstract**: Driven by the multi-dimensional evolution of generation, grid and load, the morphology of urban power grids is experiencing radical changes and unprecedented challenges. Therefore, it is urgent to investigate the underlying evolutionary mechanism and to design a rational development roadmap. First, the current morphology of urban power grids and the challenges faced are analyzed. Second, existing literature is reviewed from three perspectives, namely, morphological analysis, urban distribution power grid improvement, and urban transmission power grid improvement. Specifically, the section on morphological analysis covers statistical-characteristic analysis, weak-link identification, and evolutionary-trend analysis. Urban distribution power grid improvement methods are discussed in terms of network-structure reinforcement, integration of new elements, and adoption of novel power-supply modes. Urban transmission power grid improvement approaches are summarized from both theoretical foundations and relevant engineering practices. Finally, this paper put forward prospects in the future development direction of power-grid morphology from the perspectives of theoretical methods and technologies, aiming to provide a reference for follow-up research on urban power-grid morphology.
**Key words**: urban power grid; morphological optimization; modern power system; fractal; complex network theory; flexible interconnection

## 0　引言

城市电网外部威胁极端化和内部复杂随机化，对其形态的适应性带来严峻挑战。随着配电网有源化不断推进，电网形态的内涵已从以网架形态为主推广至源网荷储各侧形态。而城市电气化水平高且对电网可靠性和韧性的要求高，设计合理的城市电网形态以适应城市电网外部环境和内部源荷各侧超预期发展势在必行。

首先，随着我国“双碳”目标提出和新型电力系统建设推进，城市电网日趋复杂，源荷双侧超预

**基金资助项目**：国家电网有限公司科技项目(52094024001Y)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (52094024001Y).

期发展且不确定性大幅提升，对形态适应性和系统灵活调节能力提出更高要求。在源侧，城市各个电压层级电网的新能源装机水平不断提升，出力不确定性带来的影响日趋严重；在荷侧，电能替代进一步加速，新型负荷占比不断增加，智能家居、5G 基站、电动汽车、数据中心等新型负荷终端大量出现，并将在市场环境下形成多利益主体集群参与的深度博弈，负荷特性发生巨变。

另一方面，近年来全球气候变暖和动荡的国际形势恶化了能源基础设施外部环境，凸显了电力能源系统在极端事件下的韧性需求。城市人口密度大，且担负着重要的政治、经济、文化、社会职能，重要电力用户数量大，负荷密度高，停电事故负面影响严重，因此提升城市电网应对非常规事件下的韧性、增强其在非常态下的保供电能力，意义重大。

从电网形态的角度切入，分析并设计合理的城市电网形态，有助于从顶层加速电网形态演进，以更好地适应城市电网内外部变化、提升灵活性和韧性。从网络科学的角度来看，网络结构决定网络功能[1]；此外，由于电源和负荷为电网中的供需主体，因此源荷分布也极大地影响电网的功能。长久以来，实际城市电网的发展根据电网规划设计原则，基于原有的元素进行局部优化扩建[1]，逐步演化形成目前的形态，是一个长期缓慢演进的过程。然而近年来城市电网中新元素不断大规模超预期涌入，现有城市电网形态和形态演进速度难以很好地跟踪适应，叠加外部威胁极端化、多元化，如何从底层机理角度分析优化城市电网形态，确保城市电网形态科学合理快速演化，是亟待解决的问题。

本文拟从电网形态的角度切入，首先分析我国大型城市电网现有形态并分析面临的挑战，而后从复杂网络理论和网络演化视角综述梳理电网形态分析方法，然后从城市配电网形态改进方法、城市输电网形态改进方法两方面，从电网形态角度对输、配电网层级面对的灵活性提升等相关研究进行梳理和综述，最后展望电网形态未来研究方向，以期为相关领域研究提供参考借鉴。

## 1 城市电网现有形态分析及面临的挑战

### 1.1 城市电网现有形态分析

城市电网一般为负荷中心，负荷密度大。为了限制系统短路电流等原因，城市电网输电网一般分区运行，每个分区由一个或多个 500 kV 变电站为中心，相连的 220 kV 节点形成骨干网架带动分区内负荷运行，分区间联络线常开，断开电磁环网，降低分区短路电流，故障时可闭合形成分区间功率互济。分区运行分为一站一区和多站多区交叉供电两种模式，如图 1 所示。

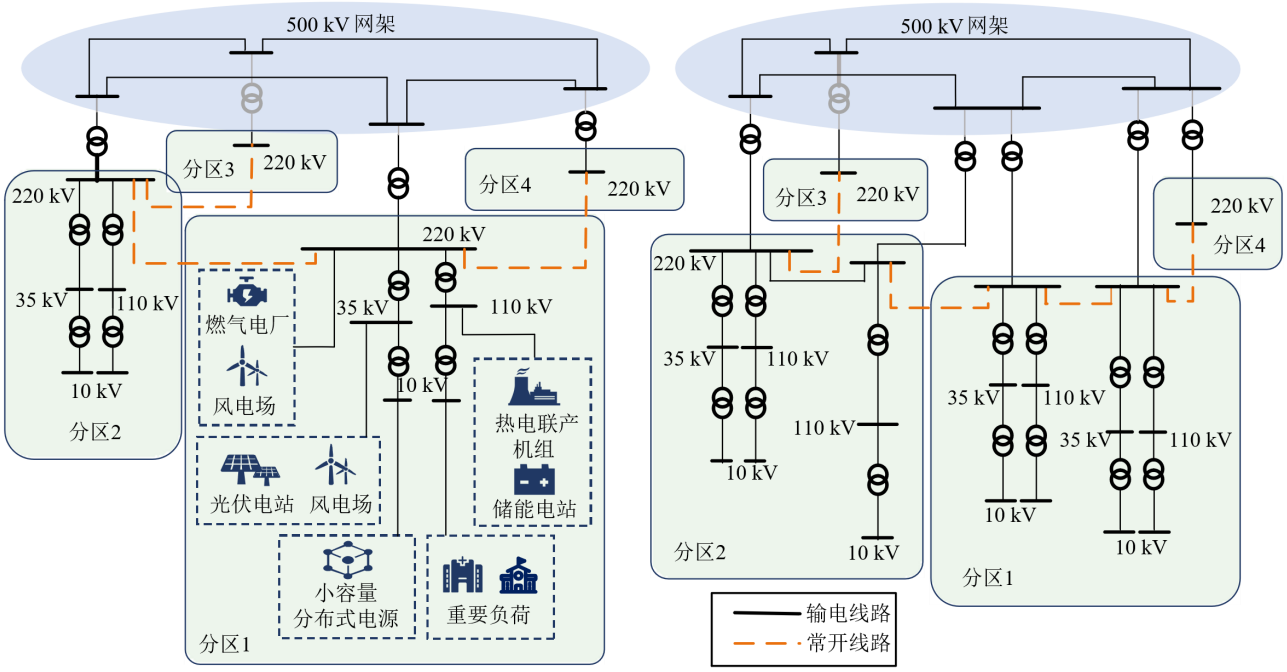



图 1 城市电网一站一区和多站多区供电模式示意图

Fig.1 Schematic diagram of power supply modes in urban grids: single substation-single zone and multi-substation-multi-zone configurations

城市高压配电网结构主要分为辐射、环网、链式 3 种结构[2]。辐射状结构接线简单，但不满足 $N-1$ 要求，可靠性较差，适用于负荷密度低、可靠性要求不太高的地区，或者将其作为网络形成初期、上级电源变电站布点不足的过渡性结构。环式结构对电源布点要求低，扩展性强，但供电电源单一，网络的供电能力小，适用于负荷密度低，电源点少，网络形成的初期。链式结构由双侧电源供电，运行灵活，供电可靠性高，但出线回路数多，投资大，适合为供电可靠性要求高、负荷密度大的区域供电。城市中低压配电网层级，配电网结构主要包括辐射状、单环网、双环网等[2]，针对城市重点区域配电网的高供电可靠性要求，国内外提出了单花瓣、双花瓣、钻石型和雪花型等高可靠配电网形态结构，将在第 3 章详细阐述。

### 1.2 城市电网形态演进过程中面临的挑战

在“双碳”战略驱动下，新型电力系统建设全面提速，城市电网运行工况日益复杂，城市电网正从“源随荷动”的单向网络演变为“源-网-荷-储”深度耦合的复杂系统[1,3]。另一方面，全球气候变暖和国际形势动荡背景下，电网外部环境恶化，城市电网面临威胁多元化和“常态化”的挑战。在上述变化下，对电网形态演进路径提出更高要求，如何从底层机理角度分析优化城市电网形态，确保城市电网形态科学合理快速演化，是亟待解决的问题。

具体地，输电网形态层面，远距离输电可能经过城市电网或以城市电网为主要受电侧，城市输电网网架耦合日益紧密，面临潮流穿越问题或大规模消纳难题。与此同时，城市内部负荷持续增长，220 kV 分区电网存在空间和时间层面的负荷不均、短路电流水平短时超限等风险，亟需分析现有形态适应性，并进一步优化形态以提升适应性。

配电网形态层面，伴随着城市内部电力负荷持续增长，短路电流水平持续上升，出现了配电走廊紧张、馈线负载率过高和分布不均衡的问题，亟需更灵活的配电网架[4]。与此同时，随着 5G 基站、电动汽车、数据中心等新型负荷的不断发展，针对直流负荷更加高效友好的配电形式也有待探索。

为应对上述内外部变化，亟需研究对具有高度灵活性和适应性的受端城市电网形态分析、优化相关理论和技术。下面将分别从形态分析方法、局部优化方法和整体优化方法 3 个方面对现有研究进行综述，并对未来研究方向进行展望。

## 2 电网形态分析方法

21 世纪以来，尤其是以 2003 年由连锁故障导致的美加大停电为起点，诸多学者开始专注利用图论、矩阵论、复杂系统方法(如复杂网络理论)等整体性地研究电网形态分析方法，主要从电网络统计特性分析、形态结构薄弱环节分析和演进分析等方面展开。

### 2.1 电网结构统计特性分析方法

以连锁故障导致的大停电为触发点，电网领域的学者开始关注利用复杂网络理论研究电网的统计特性，如小世界特性、无标度特性、自组织临界性等，进一步揭示系统功能特点。研究表明，许多实际电网，如中国和美国的大电网，都表现出明显的小世界特性和无标度特性[5-6]。小世界网络具有较短的平均路径长度和较高的聚类系数，这意味着电网中的任意两个节点之间可以通过较少的连接到达，同时局部区域又具有较高的连接密度。这种特性使得电网在正常运行时具有较高的传输效率，但也可能导致故障的快速传播。无标度网络则表现为节点的度分布遵循幂律分布，即网络中存在少数连接度极高的“枢纽”节点，而大部分节点的连接度较低。这种结构使得随机移除一个节点大概率是连接度较低的节点，对网络的整体结构影响较小，因此电网对随机攻击具有较强的鲁棒性。然而，一旦枢纽节点受到蓄意攻击或发生故障，就可能引发大规模的连锁反应，导致整个网络的崩溃。文献[7]通过统计我国 1981—2002 年的停电事故得出我国电网具有自组织临界性的特点。文献[8]提出一种基于节点度分布、聚类系数等电力系统统计特性的电力系统测试算例生成方法，通过复现电力系统小世界特性以满足后续电网脆弱性研究仿真验证需求。文献[9]依据复杂网络小世界特性构建电力系统与天然气管网综合传输网络，并采用平均节点度、边节点比等复杂网络理论指标验证网络结构合理性。

另一方面，由于实际电网数据保密的特点，分析并量化电网形态特征，可进一步生成符合实际电网特点的虚拟算例，以供研究人员分析[10]。传统基于复杂网络理论的电力系统模型构建方法将电网抽象为无标度或小世界网络，通过随机图模型重现统计特征，但现有方法大多仅重现度分布等宏观统计特征，忽略了节点和边的物理属性。以图神经网络(graph neural networks, GNN)为代表的深度学习架

构通过消息传递机制聚合节点-边特征，能够通过隐式方式有效编码电网的图结构特性，在保证算例数据隐私性的同时往往能生成更加真实的网络模型。因此研究者开始通过图神经网络、生成对抗网络等人工智能方法捕捉电网特征，生成满足电网形态特征的算例。文献[11]通过确定性算法为拓扑节点与电力网络物理特性构建映射，所构建电气-通信网络模型可以保留通信链路带宽、输电线路容量等网络物理信息，基于该方法所生成网络的拓扑参数与真实网络差异较传统方法更小。文献[12]将生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)用于主动配电网虚拟算例的生成，通过对抗训练，生成器可以学习到算例样本的拓扑结构、资源配置的数据分布，从而生成高质量的网络数据。

以上统计特性均是针对单一电压等级的电网进行研究得出的。城市电网是包含输配多个电压等级的网络，也有学者统筹考虑多电压等级，指出电网在不同空间尺度下表现出自相似性。文献[13]指出，电力系统从发电机到用户的输电过程是反复经历“降压和分流”的层级结构，决定了电力网络拓扑具有一定的自相似性。针对城市电网的层次结构，研究其小世界特性、无标度特性和自相似性等，对于深入理解并揭示电网形态的演化机理、并进一步研究优化策略具有重要意义。

### 2.2 电网形态结构薄弱环节分析方法

传统的电网形态结构薄弱环节分析方法通常结合电网结构统计特性的结论，通过加权拓扑构建电力系统复杂网络理论模型，结合网络权重与聚类系数、节点度数、边介数等网络科学的指标，改善电力系统拓扑的小世界特性，进而提出故障连锁传播预防和缓解措施，在识别电网中的关键节点和脆弱线路的同时，还能为评估电网的鲁棒性和脆弱性提供新的量化指标。文献[14]针对大电网进行拓扑特征有权建模，综合考量网络拓扑统计特性和脆弱性权重，所提可靠性加权指标可为薄弱环节辨识提供网络科学视角，结合经济性评估发掘网络中重要性低但脆弱性高的供电路径，从而避免连锁故障传播。文献[15]提出电气出/入度中心性、介数中心性和加权潮流转移熵 4 个指标，用于辨识电网脆弱线路，改善电网无标度特性带来的蓄意攻击下的脆弱性。文献[16]提出了考虑节点位置和临近节点依赖关系的节点重要度评价方法，为确定节点恢复路径、改进网络重构策略做出贡献。文献[17]考虑了输电线路的距离、容量等相关特性，将新型复杂网络模型应用在电网的关键元件辨识环节中。文献[18-19]应用介数中心性、接近中心性反映节点重要程度的指标，评估重要节点遭遇攻击后的网络连通性，提出一种根据节点接近中心性的分段式节点保护方法，从而提高系统遭受网络攻击后的连通度。

相较于上述针对单一电压等级大电网的薄弱环节识别方法，目前已有学者针对电网在不同时间、空间尺度下的自相似层次结构，采用分形理论对电网网络薄弱环节进行分析。文献[20]结合对电网分形机理的研究，发现枢纽节点直接相连会使网络更加脆弱，据此设计了一种基于最大边介数生成树的复杂网络拓扑改进策略，改善电网络面对蓄意攻击时的鲁棒性；文献[21]提出了一种通过求取地理接线图的分形维数预测区域短路电流的方法，通过电网结构分形维数与短路电流基本模型，建立了电网结构分形维数与短路电流的数学关系，从而预测短路电流、识别电网薄弱环节。

### 2.3 电网形态演进分析方法

电力系统演化理念借鉴生物种群演化的思想，致力于建立网络演化模型来模拟电网生长过程，以辅助指导电网规划与建设。早期的研究主要从复杂网络角度，通过设定参数使电网按照不同网络模式演化[1]，这种基于经典网络模型而建立的电网演化模型可体现电网某一既定形态(如无标度网络或小世界网络等)的生长演化过程，具有一定的理论价值与工程意义。文献[22]基于局域世界演化模型提出了基于邻域电网演化模型的电网生长演化方法，利用所提模型复现了三代电网演化生长过程，从物理驱动的角度复现了电网的演化过程。文献[23]提出了基于网络生长概念的电力系统时空演化模型，通过调节参数可使所生成网络的拓扑特征参数较好拟合实际电网参数，很好地反映了电力网络的演化特征。文献[24-26]基于复杂网络的异速生长研究电网规模发展变化规律，根据理想化的电网零阶模型验证了电网规模和用电量之间存在亚线性的增长关系。

以上研究主要关注负荷需求持续发展作用下的电网生长演化规律，也有学者从增强系统性能角度切入，以演化手段生成更优的电网形态。文献[27]根据城镇生长特性总结了空间负荷的增长特性，进而基于复杂网络理论中的随机几何图模型模拟城镇负荷的增长过程，然后以最小化投资建设成本为目标，规划得到区域能源网的能源站和综合管线分布。

文献[28]考虑城市电网韧性提升需求，提出了基于演化博弈的低碳城市电网长期韧性仿真方法，建立了考虑灾害随机性的韧性演化仿真模型。文献[29]基于自组织临界性理论，建立了能够反应电网连锁反应快动态和长期发展慢动态的连锁故障和停电模拟模型，从而更真实地反映电网长期发展中的故障传播与停电风险。文献[30]结合节点故障度指标，提出综合衡量配电网拓扑与目标网架或历史网架相似度以及基于元件故障率的配电网拓扑结构可靠性的配电网规划方法，从而得出面向已有网架或典型网架接线方式的配电网结构改进方法。

### 2.4　小结

现有电网形态分析相关研究针对输配电网拓扑结构特征，在形态统计特性、连锁故障薄弱环节和形态演化分析等方面取得一定进展。而随着源、网、荷协同演进，城市电网各层级新能源渗透率持续升高，且新型互动负荷不断增加，现有研究难以适应多电压层级城市电网形态分析，且缺少对系统源网荷互动形式的精细刻画。需要针对城市多层级电网，研究其网架形态、源荷分布形态分析方法，刻画源网荷互动能力，挖掘城市电网形态特征影响其功能的内在机理，为提升城市电网灵活性和韧性提供底层支撑。

## 3　城市配电网形态优化方法

为了满足城市电网中局部配电网的高可靠、灵活供电需求，已有诸多对城市电网形态局部优化相关研究和实践。本章从网络结构改进、新元素引入和新供电形式 3 个层面对现有城市电网形态局部改进方法进行综述。

### 3.1　基于网架结构改进的配电网形态优化

增加网架冗余度可以为重要负荷提供多重供电保障，进而提升局部配电网供电可靠性，目前针对高可靠供电需求的区域，国内外提出了若干高可靠网架形态，部分已投入试点应用，如图 2 所示。

在国外，法国巴黎提出 20 kV 三环网接线方式，供电可靠性较高，线路利用率为 50%[31]；新加坡电网提出“单花瓣”供电结构，需要配电网合环运行，单一线路故障时能够全容量保障供电且不存在瞬时停电[31]；东京城市核心区采用 22 kV 点网式接线[32]，站内主变和所供线路均并列运行，正常运行时线路负载率可达 67%，单一线路故障发生时不存在瞬时停电，但变电站之间缺乏线路联络，站间负荷转供和平衡能力不足，全站停电时会导致全部负荷失电，可靠性不高。

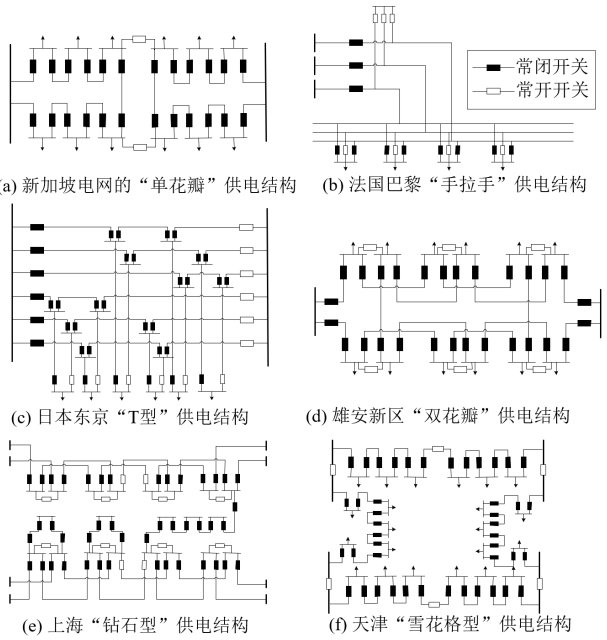



图 2　高供电可靠性配电网网架结构

Fig.2　Distribution network topologies with high reliability

近年来我国多个大型城市电网也开展了新型网架试点研究[33]。雄安新区的电缆“双花瓣”接线，“双花瓣”之间接入的开关站分段开关开环运行、互为备用，供电可靠性较高，线路利用率为 50%，负荷转供能力达到 100%，但需要合环运行，运维管理难度较高，并且线路建设规模大，开关站造价较高；文献[31-32]和文献[34]论证了上海钻石型电网的高可靠性，上海钻石型接线以开关站为网架结构核心，构建双层双环网结构，供电模式为不同变电站双侧电源，供电可靠性较高，可实现站间负 100%转供，负荷转供通道多，相较于单环网和单花瓣接线能提高线路利用率，但开关站造价高。雪花格式网架结构是将 4 组单环网两两分组组网成环后，在关键节点添加 4 条站内联络线形成[35-36]，通过对每段馈线进行适当的分段和联络，提高负荷转供能力和设备利用率，在负载率为 75%的情况下，仍可实现变电站 $N-1$(线路 $N-2$)情况下故障负荷的全部转移，负荷转移率达到 100%。

### 3.2　基于新元素引入的电网形态局部优化

除改进网架形态提升可靠性外，已有研究通过引入微电网、柔性互联装置等新元素，并提出基于新元素的中压配电网新形态，也开展了一定实践工作，提升城市局部电网对分布式能源、储能与需求

侧资源等新型资源的承载和调控能力[4,37-38]。

微电网技术为可再生能源的分布式并网发电及消纳利用提供了良好的接口[39]。文献[39-42]设计了多微网系统的运行交互框架，在降低配网运行成本的同时，扩大了多微网、高渗透率场景下微网的运行空间，改善了系统灵活性。文献[43-46]提出了多能微网(multi-energy microgrid, MEMG)在线调控方法，有效应对多能微网运行过程的显著不确定性，在降低用能成本的同时促进分布式资源消纳，实现多能互补互济。以上研究中，虽已达到广域互联，但由于单个微网的容量小、调节能力差，无法做到独立自治运行，其可靠运行仍需要配电网的支撑[47]。已有多微网方案多采用传统联络线对微网进行互联，难以满足微网并网/孤岛切换的灵活性以及微网间功率实时交换的需求[48]，进一步改进微网互动效率亟需微网间柔性互联环节的引入。

传统配电网采取闭环设计开环运行的模式，潮流随网络结构参数以及负荷需求而自然分布，只能通过开关操作的网络重构才能在一定程度上改变潮流分布[4,49]。开环运行潮流控制力不强，无法实灵活的现潮流转供和电压支撑。而引入智能软开关(soft open point，SOP)等柔性互联装置(flexible interconnection device，FID)，可以实现将传统开环运行的配电网改为柔性闭环运行，改善配电网负荷转供能力和供电可靠性[50]。文献[51]在配电网分区边界引入 SOP 与直流充电装置相结合的柔性互联装置，并提出了通过柔性互联装置进行互联的配电网之间相互协调，实现整体系统的经济运行的优化模型。文献[52]利用 SOP 实现微网间柔性互联，同时考虑系统电压差值和功率裕度，所提 SOP 控制策略相较传统方法进一步减小电压偏离度和子网功率不平衡度，改善系统灵活性、降低电压越限风险。同时现有研究充分利用 SOP 对系统潮流和电压水平的控制能力，提出对非故障停电区域的快速供电恢复方法。文献[53]采用二阶锥规划方法整体求解负荷恢复策略、确定 SOP 运行参数，相较传统方法显著改善系统对炼钢厂等重要工业负荷的恢复能力。文献[54]提出一种迭代计算更简捷的含 SOP 的配电网分布式供电恢复方法，在获得更快求解速度的同时，相较传统方法更充分发挥 SOP 灵活可控的特点，提高系统恢复能力。

蜂巢状中压配电网综合了微网群和柔性配电网的特征与优势，是未来智能配电网网架形态演化的一种可能路径。文献[48]提出微网群和柔性配电网的融合可看作是蜂巢配电网(honeycomb distribution network，HDN)的雏形，蜂巢配电网将按一定规范配置的微电网作为基本单元，在网架引入 SOP 进行能量转供[55-57]。文献[58-59]提出了基于 SOP 六边形馈线网格构成的蜂窝状配电网的构想，文献[60]提出了基于柔性互联的蜂巢配电网具体组网运行方式，比较了蜂巢电网及其派生多边形结构的区别和优点。文献[61]强调了合理的网架结构对配电系统功能的重要影响，针对蜂巢配电网等中压配电网中出现的新形态，说明了实现广域互联的网孔型配电网的结构优势并提出了由传统配电网向网孔型配电网过渡的改造方法。

基于柔性互联环节引入的电网形态改进已有较为广泛的示范工程应用，多集中于中低压配网形态优化，以提升不同区域互补互济能力，增强重要负荷保障效果。湄洲岛柔性互联系统将辖区内 5 个低压台区柔性互联，在缓解部分台区出现重过载隐患的同时，大幅提升台区间功率互济能力，保障海岛居民恶劣天气环境下的持续可靠供电[62-63]。东莞松山湖柔性互联示范工程采用柔直背靠背设备连接园区内变电站功率可灵活控制的在线合环运行，缓解园区工业型负荷负载压力，提高配电网整体供电可靠性[64]。杭州江东新城智能柔性直流配电网示范工程在实现台区间柔性互联的基础上，为直流型电源和负荷提供接口，在进行互联系统功率调节的同时，实现了直流形式源荷储的高效接入[65]。

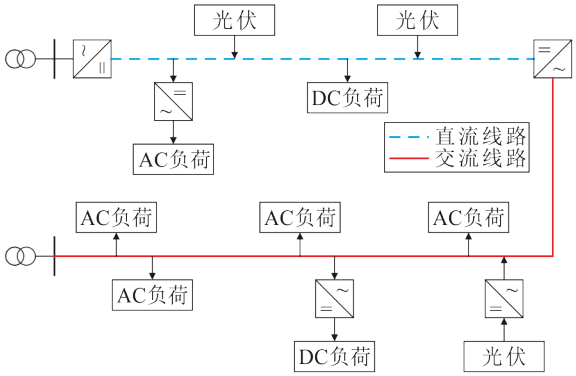
### 3.3 基于新供电形式的电网形态局部优化

直流供电由于其在供电效率和质量等方面的优势，同时利于光伏、储能、电动汽车等设备接入，亦有学术界和工业界研究人员探索基于直流供电形式的城市电网形态局部优化方案。

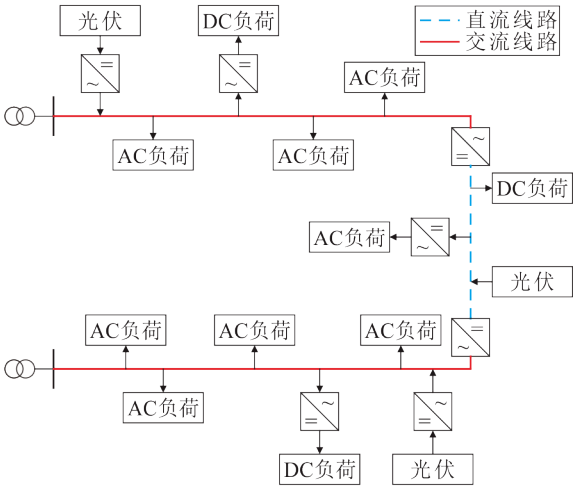
面对新型源荷大规模接入配电网的场景，与仅采用 SOP 设备实现柔性互联[66]相比，通过对现有线路进行直流改造或新建直流线路，并利用电压源换流器(voltage source converter, VSC)将其与现有交流配电馈线互联从而构成交直流混联配电网，可实现光伏、储能、电动汽车等直流设备友好接入，减少换流环节。此外，构建交直流混联配电网可有效减少线路功率损失[67-68]。由于直流供电不存在无功功率，因此可以利用全电流额定值传输实际功率，提高线路的供电能力；同时线路压降可显著降低，缓解线路末端的低电压问题[69-70]。

此外，直流配电网的建设也对 5G 基站、互联网数据中心、直流充电站为代表的具有直流化特征的负荷可靠、安全接入意义重大[71-72]。5G 基站功率达到 4G 基站 4 倍左右，且发展迅速，对城市配电网带来严峻冲击。数据中心耗能巨大、对供电可靠性和电能质量要求高。为应对以上挑战，采用直流配电网可有效减少电力变换环节，降低压降，隔离交流侧故障和干扰，保障负荷电能质量[73-74]。

文献[68]与文献[75]详细介绍了现阶段应用较多的中压配电网交直流混联方案，主要可分为交流馈线-直流馈线混联型和基于直流实现交流馈线联络的交直流混联配电网，见图 3。图 3(a)所示方案通过在交流配网上级变电站装设 VSC 设备，将交流线路改造为直流线路，再于直流线路末端加装 VSC 设备从而与临近交流线路互联。该方法在不新建线路的前提下通过直流改造增加线路容量，并可实现转供功率灵活调控。图 3(b)所示方案为在两条交流馈线之间新建一条直流线路，与柔性互联方案相比，该方案在提升互供功率调节能力的同时，友好接入直流负荷。




(a) 交流馈线-直流馈线混联型配电网




(b) 基于直流实现交流馈线联络的交直流混联配电网

图 3　典型交直流混联配电网结构

Fig.3　Typical topology of AC/DC hybrid distribution network

### 3.4　小结

本章梳理总结了现有城市局部电网高可靠拓扑形态、柔性元素引入、交直流混联改造 3 方面研究及工程实践，相关方法可缓解城市中压配电网配电走廊紧张、馈线负载率过高和分布不均衡问题，同时为 5G 基站、数据中心等大量出现的直流“新基建”提供友好接入方案。然而，现有高可靠拓扑在存在线路利用率低与经济性不足的问题；引入柔性设备和新的供电形式是可行路径，但仍需探索可复制推广、兼顾经济性和性能提升的解决方案。

## 4　城市输电网形态优化方法

随着新能源大规模开发利用，远距离输电可能经过城市电网或以城市电网为主要受电侧，城市输电网网架耦合日益紧密，面临潮流穿越问题或大规模消纳难题。为了限制短路电流，城市电网通常分区运行，然而分区间一般弱联络，互济能力差。针对上述问题，现有研究通常从灵活资源配置和增强分区柔性互联能力两方面优化城市电网整体形态。

### 4.1　基于灵活资源配置的电网形态整体优化

随着新能源资源的大规模接入，系统净负荷波动的加剧对系统灵活性提出更高要求。系统灵活性可以总结为系统机组运行状态和网架结构针对源荷波动的调整能力[76-77]。传统火电机组出力灵活可控，兼具满足系统电力电量平衡与调峰调频需求[76-77]的能力，而对于新能源渗透率较高的部分电网区域，风电、光伏等新能源电源反而因随机性使其无法替代传统火电机组向系统提供灵活调节能力，亟需研究相应的功率资源优化配置手段和网架结构优化方法。

现有基于网络功率资源匹配层面的灵活性改善研究通过将系统爬坡资源作为约束引入，通过考虑不同爬坡资源的引入，从而得出不同时间尺度优化下改进系统的灵活性的方法。文献[78]将抽水蓄能作为灵活性资源，通过有序安排抽水和发电工况以增加和降低负荷需求，从而通过净负荷调峰和爬坡容量的需求调节，协同运行机组提升系统的灵活性供需平衡能力。文献[79]通过将光伏电站分组改变光伏集群出力特性，再将光伏分组与梯级水电站汇集形成水光分群后接入电网，充分发掘水光资源互补特性，从源侧提升系统灵活性。

除此之外，越来越多的研究开始考虑传输网络或具有潮流调节功能的网络型灵活性资源所具备的灵活性调节能力[80]。相关研究仅从“源-荷”的角度

实现灵活性分析，忽略了灵活性资源的空间分布情况对电力电量可到达性的限制，其适用于网架结构简单、传输容量充裕的输电网[81]。文献[82]考虑到系统中线路的传输容量裕度不足可能造成原本容量充足的备用在实际中无法投入使用的情况，改进传统安全约束机组组合调度模型，在保证发电成本仅增加不高于设定值的前提下，明显提高了重载线路的安全裕度，降低输电线路发生阻塞和故障风险，提高系统备用可用性。文献[83]建立考虑关键断面传输约束的系统运行灵活性评估方法，该方法可以发掘关键断面传输约束的对备用功率资源的影响，从网络传输的角度出发改善系统灵活性。与此同时，有学者提出采用输配协同方法，通过改变高压配电网拓扑改善地区电网潮流分布、平抑输电通道堵塞风险的系统灵活性提升方法。文献[84]面对地区电网局部消纳困难和局部重载并存的现状，提出一种考虑风电-负荷预测不确定性的网络重构方法，通过改变 110 kV 高压配电网的拓扑运行状态，有效消解 220 kV 层面输电网的阻塞风险。文献[85]提出一种考虑储能与高压配电网网架重构的协同优化策略并开发相应辅助决策系统，充分发挥储能有序充放电与高压配电网负荷转供的协同优化作用，缓解输电线路阻塞，在避免开关频繁动作的同时改善储能设备的使用寿命。

### 4.2 基于分区柔性互联的形态整体优化

220 kV 电网是连接超高压输电网和配电网的重要环节，通过引入柔性互联技术，可以提升 220 kV 网架的灵活性和可靠性。目前，我国的 220 kV 电网大多采用环网或辐射状的网架结构。潮流分布受网络参数影响较大，难以进行灵活控制。当电网发生故障时，潮流的转移可能会对其他线路造成冲击，甚至引发连锁故障。此外，随着新能源的大量接入，220 kV 电网的潮流波动加剧，城市电网的源荷分布不均和不同分区电力需求的不均衡，导致输变电设备容量紧张与过剩并存，新能源消纳严重受限[76]。采用柔性电力电子技术进行城市电网间分区柔性互联，是解决上述问题的新技术手段。通过在城市电网内部或之间构建柔性互联通路可有效增强网架输送能力，强化系统消纳水平[86]。

城市电网区域间的柔性互联可以按照采用直流或交流互联装置进行区分。统一潮流控制器(unified power flow controller，UPFC)是柔性交流输电技术的代表性装置。在南京西环网工程中，UPFC 被用于调节系统侧向负荷侧的潮流传输，均衡南京西环网各输电通道的潮流分布，避免了对地处南京市中心的西环网区域新建输电通道或增容改造的巨大投资和施工难度，改善了南京西环网的供电能力[87]。其他柔性输电设备应用如我国江苏扬州 110 kV TCPST 示范工程、美国 Marcy 变电站可转换式静止补偿器工程等，均能起到均衡线路负载、提高系统消纳能力的作用[76]。

柔性直流互联技术在城市电网中具有广阔应用前景。分区间柔性互联通过改变联络线传输功率，可使区域间联络更好地配合地区内部电源的运行方式，从而使系统达到经济性更优的工作状态组合[76,86,88-89]。文献[76]提出地区电网柔性互联规划的基本框架，并提出高比例新能源接入背景下系统潮流与柔性输电设备控制模式强耦合特性，说明规划方案须进一步考虑运行特性影响。文献[86]提出城市电网分区间柔性互联规划技术，通过构建城市电网分区源荷间直联通道，缓解分区间输电网架传输冗余和新能源消纳压力。文献[89-90]立足工程实践，介绍北京电网 220 kV 分区柔性互联示范工程，该工程在怀柔站侧的一条联络线上安装柔性互联装置，代替常规开关，能够均衡分区间的负载，明显提升 500 kV 层面和 220 kV 层面电网的静态安全性，提高故障分区进行紧急功率支援能力，降低故障分区的短路电流水平。

### 4.3 小结

由于城市空间有限，因此一般仅可在城市周围部署相应的灵活性资源或保障性资源，城市内部电源“空心化”现象加剧，值得警惕。此外，城市内部柔性互联环节的部署需统筹考虑新能源消纳、分区间平衡需求、安全可靠运行等因素，同时需要评估对电网调度运行、管理等带来的影响，兼顾系统安全性和经济性，选择合适的柔性互联设备和部署位置。

## 5 城市电网形态发展方向和关键技术展望

### 5.1 基于分形的城市电网形态分析理论

国内外有诸多学者对电网/电力系统的现有形态或未来形态进行了分析或预测展望。早在 2006 年，美国工程院院士 Robert Calderbank 就提出了分层优化解耦的架构和方法论，为网络系统全局优化提供分布式解决方案[91]；2009 年，梅生伟教授提出了输电网-配电网-微电网三网合一的未来电网规划

设计理念[92]；余贻鑫院士于 2020 年提出了分层分群电网体系结构[93]，即“将系统分解为群集的层次结构和全局协调”以及“每个集群都保持自己的净功率平衡和局部自优化”，以适应未来电网的需要；舒印彪院士针对未来新型电力系统构建问题，提出以分层分区平衡理念优化资源配置，既规范分布式电源有序接入，又统筹主配微协同发展[3]。以上关于未来电网形态的核心观点基本一致，即电网的每个层级都应配置一定资源，具备一定自给自洽能力，有利于提升灵活性和极端情况下的保供能力。

而实际城市电网也在外部环境、宏观政策、内部负荷增长、技术进步和电网本身发展需求等多重因素作用下，源网荷协同演进，逐步涌现出具备多层级自相似系统——各个电压等级电网均包含源网荷等元素，并具备一定的功率自平衡能力和局部自优化能力在常态运行场景下，自上而下来看，各个等级自平衡子系统将下级子系统看作一个节点，进行调度计划制定并下发；自下而上来看，各个平衡子系统基于上级指令进行各自运行计划并向上反馈，可实现常态协同促消纳。非常态下，各个子系统具备自治及自平衡能力，彼此之间存在嵌套冗余，可以在上级电网断电时灵活切换到孤岛运行模式，实现非常态局部自治保供电。

以上结构与自然界中海岸线的形状、星系的分布非常相似，即在不同尺度下依然保持相似的结构，在数学意义上属于分形理论。可基于分形理论，分析包含不同层级的城市电网形态特征，提出送电功能和源荷分布的自相似性量化方法，并建立自相似性与灵活性和韧性等功能指标的联系，深入挖掘形态隐藏的统计特征对系统的灵活性和韧性的影响规律，进而优化设计城市电网，使得各层级电网之间具备自相似特性且具有一定自组网和独立运行能力，有效降低规模带来的脆弱性，提升城市电网的灵活性和韧性。

### 5.2　考虑柔性互联的电网形态评估技术

柔性互联是解决城市电网输电网层面和配电网层面负荷快速非均匀增长导致各个分区或馈线负荷短路电流水平超标和不均衡问题的有效手段[76]。因此需要评估城市电网未来电力流及现有设备适用性，分析柔性直流、UPFC、储能等电力电子柔性互联及调控设备对城市电网潮流调节能力的影响。同时需要研究基于多类型柔性装备的城市电网对外耦合与内部互联形态构建方法，提出交流联网、交流分区、柔直分区、直流组网等多种未来大型受端城市电网形态。研究不同电网形态下基于稳态约束的城市电网负荷和新能源承载能力评估方法[76-77]。

此外，相关的建模仿真控制技术有待进一步突破。重点考虑关键柔性控制环节，研究适用于柔性互联新形态的城市电网建模方法；统筹考虑正常运行和极端场景，研究计及新能源随机性和极端事件影响的城市电网典型运行场景生成与快速仿真技术；从暂态稳定、静态安全等方面，对提出的多种电网形态开展交直流仿真分析，研究电网形态在未来城市新型电力系统中的适应性；考虑新形态城市电网特点，研究基于多类型柔性装备的新形态城市电网高适应性运行和抵御故障冲击的稳控策略。

进一步，需要结合电网发展现状及未来规划，统筹考虑经济性、安全性、韧性、低碳性等多个维度，构建大型城市电网形态多维度评估指标；研究基于新形态下多场景推演仿真的电网形态多维度评估方法，对提出的多种电网形态开展多维度评估，分析各形态电网应用场景及优劣性。

### 5.3　基于生成式人工智能的电网形态优化技术

从复杂网络角度和分形理论等角度描述城市电网形态特性的指标众多，如何结合电网本身的特性确定合适的指标，甚至结合电网特点提出新的与灵活性和韧性等电网功能强相关的形态特性指标，是难点问题。此外，实际城市电网形态数据相对较少，难以满足机理揭示所需的映射关系发现需求。机理揭示的本质是发现各种形态指标与系统功能之间的映射关系。然而，针对某个城市电网，除现状电网形态外，可能还可获取过去有限年份的形态，实际城市电网形态数据有限，难以满足机理发现需求。因此需要生成大量满足约束的城市电网形态。而城市电网形态受多种因素限制，如何统筹多种因素或规则，生成满足各项约束的形态，用于机理发现和后续设计，是需要解决的难点。

针对上述问题，可采取生成式人工智能中的图神经网络离散降噪扩散模型生成若干满足条件的分形形态，并采取原理分析与仿真测试相结合的方式探究城市电网形态对灵活性和韧性等功能的影响机理[11-12,94]。结合现有城市电网数据，并基于随机分形方法生成城市电网形态，并仿真得到每种形态下的灵活性和韧性指标值，作为初始训练数据，然后利用图神经网络离散降噪扩散模型来生成大量满足条件的电网形态，主要步骤包括：通过训练以降噪

扩散轨迹，并通过对噪声进行采样和递归去噪来生成新的样本；最后，结合研究不同形态下各类指标的变化情况，验证并修正影响机理结论，反复迭代，最终揭示电网形态对韧性和灵活性的影响机理，并优选城市电网形态。

## 6 结语

本文从电网形态分析方法、城市配电网形态优化和输电网形态优化 3 个维度对现有研究进行了梳理和综述，同时对未来的发展方向进行了展望，以期为城市电网形态相关研究提供借鉴。

随着外部威胁不断加剧、内部源网荷协同演进下电网更加复杂，强不确定性条件下对城市电网形态提出更高要求。未来需要在城市电网形态分析理论、形态评估和优化关键技术和工程实践等方面进一步突破，采用新理论和新技术构建新的网架形态、运行形态、源荷互动形态，提升城市电网灵活性、韧性和绿色低碳水平，为城市发展提供有力支撑。

## 参考文献 References


[1] 卢明富，梅生伟. 小世界电网生长演化模型及其潮流特性分析[J]. 电工电能新技术，2010，29(1)：25-29.
LU Mingfu, MEI Shengwei. Evolutive model of small-world power grid and its power flow analysis[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(1): 25-29.

[2] 国家能源局. 配电网规划设计技术导则：DL/T 5729—2023[S]. 北京：中国电力出版社，2024.
National Energy Administration. The guide for planning and design of distribution network: DL/T 5729—2023[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2024.

[3] 舒印彪，张正陵，汤涌，等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报，2024，44(21)：8327-8340.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8327-8340.

[4] 王皓靖，郭佩乾，时珊珊，等. 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J]. 电力系统自动化，2025，49(5)：13-23.
WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of flexible interconnection technology for multi-station areas in medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 13-23.

[5] 孟仲伟，鲁宗相，宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化，2004，28(15)：21-24，29.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24, 29.

[6] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 025103.

[7] 于群，郭剑波. 我国电力系统停电事故自组织临界性的研究[J]. 电网技术，2006，30(6)：1-5.
YU Qun, GUO Jianbo. Study on self-organized criticality of power system blackouts in China[J]. Power System Technology, 2006, 36(6): 1-5.

[8] WANG Z F, SCAGLIONE A, THOMAS R J. Generating statistically correct random topologies for testing smart grid communication and control networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 28-39.

[9] ABU-KHALIFA Y A, BIRCHFIELD A B. Techniques for creating synthetic combined electric and natural gas transmission grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(4): 4734-4743.

[10] 黎博，魏光瑞，钟海旺，等. 基于电网演化模型的新型输电网测试系统生成方法[J]. 电力系统自动化，2025，49(10)：135-144.
LI Bo, WEI Guangrui, ZHONG Haiwang, et al. Generation method for new transmission network test system based on power grid evolution model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(10): 135-144.

[11] LIU Y G, XIE H W, PRESEKAL A, et al. A GNN-based generative model for generating synthetic cyber-physical power system topology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4968-4971.

[12] YAN R, YUAN Y X, WANG Z Y, et al. Active distribution system synthesis via unbalanced graph generative adversarial network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4293-4307.

[13] LE TTM, RETIÈRE N. Exploring the scale-invariant structure of smart grids[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(3): 1612-1621.

[14] 魏震波，刘俊勇，朱国俊，等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报，2010，25(8)：131-137.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Guojun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.

[15] 胡福年，陈灵娟，陈军. 基于交流潮流的连锁故障建模与鲁棒性评估[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(18)：35-43.
HU Funian, CHEN Lingjuan, CHEN Jun. Cascading failure modeling and robustness evaluation based on AC power flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 35-43.

[16] 傅子昊，孙磊，林振智，等. 基于节点重要度评价矩阵的网络重构双层优化策略[J]. 电力自动化设备，2016，36(5)：37-42.
FU Zihao, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Bi-level network reconfiguration optimization based on node importance evaluation matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 37-42.

[17] 冯乾，马天琳，齐程，等. 发展演化的复杂电力网络鲁棒性分析[J]. 现代电力，2013，30(6)：16-20.
FENG Qian, MA Tianlin, QI Cheng, et al. Robustness analysis of complex power grids in evolution process[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(6): 16-20.

[18] 郭明健，高岩. 基于复杂网络理论的电力网络抗毁性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学，2022，19(4)：1-6.
GUO Mingjian, GAO Yan. Invulnerability analysis of power network based on complex network[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2022, 19(4): 1-6.

[19] 王涛，刘雨濛，顾雪平，等. 基于连锁故障时空图的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报，2019，39(20)：5962-5972.
WANG Tao, LIU Yumeng, GU Xueping, et al. Vulnerable lines identification of power grid based on cascading fault space-time graph[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5962-5972.

[20] 陈志鹏，谢宁，王承民，等. 基于分形机理的复杂电力网络脆弱性评估及鲁棒性提升策略研究[J]. 电网技术，2021，45(2)：657-664.
CHEN Zhipeng, XIE Ning, WANG Chengmin, et al. Vulnerability

evaluation and robustness improvement strategy of complex power network based on fractal mechanism[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 657-664.

[21] 李宏仲，吕风磊，范宏. 基于分形维数的 500 kV/220 kV 电网结构量化方法[J]. 电力系统自动化，2015，39(10)：87-92.
LI Hongzhong, LÜ Fenglei, FAN Hong. Quantitative structure method for 500 kV/220 k V power grid based on fractal dimension[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 87-92.

[22] 梅生伟，龚媛，刘锋. 三代电网演化模型及特性分析[J]. 中国电机工程学报，2014，34(7)：1003-1012.
MEI Shengwei, GONG Yuan, LIU Feng. The evolution model of three-generation power systems and characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1003-1012.

[23] 曹一家，王光增，包哲静，等. 一种复杂电力网络的时空演化模型[J]. 电力自动化设备，2009，29(1)：1-5.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, BAO Zhejing, et al. Temporal and spatial evolvement model of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 1-5.

[24] 林子惠，武志刚，刘彦伶. 基于源荷空间匹配关系分析的电力系统异速生长规律初探[J]. 电力系统及其自动化学报，2025，37(1)：120-130.
LIN Zihui, WU Zhigang, LIU Yanling. Allometric growth law of power system based on analysis of source-load spatial matching relationship[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(1): 120-130.

[25] 郑庆春，武志刚. 基于异速生长仿真的配电网结构形态演化模型及其规模特性分析[J]. 电气自动化，2021，43(1)：95-97，111.
ZHENG Qingchun, WU Zhigang. Configuration evolution model for the distribution network and analysis of its scaling characteristics based on allometric growth simulation[J]. Electrical Automation, 2021, 43(1): 95-97, 111.

[26] 张毓灵，武志刚. 电网规模的异速生长规律初探[J]. 电力系统自动化，2020，44(17)：19-25.
ZHANG Yuling, WU Zhigang. Preliminary study on allometric scaling laws of power grid scale[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 19-25.

[27] 徐成司，董树锋，鲁斌，等. 考虑城镇生长特性的区域能源网演化模型[J]. 电网技术，2023，47(2)：529-538.
XU Chengsi, DONG Shufeng, LU Bin, et al. Evolving model of regional energy network considering town growth characteristics[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 529-538.

[28] 崔正达，姚维强，徐琴，等. 基于演化博弈的低碳城市电网长期韧性仿真方法[J]. 系统仿真学报，2022，34(12)：2595-2604.
CUI Zhengda, YAO Weiqiang, XU Qin, et al. Long-term resilience simulation on low-carbon urban grid based on evolutionary game[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(12): 2595-2604.

[29] 龚媛，梅生伟，张雪敏，等. 考虑电力系统规划的 OPA 模型及自组织临界特性分析[J]. 电网技术，2014，38(8)：2021-2028.
GONG Yuan, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin, et al. An improved OPA model considering planning and self-organized criticality analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2021-2028.

[30] 许悦，余涛. 网络拓扑结构与供电可靠性的数学关系分析[J]. 电力系统自动化，2019，43(2)：168-175.
XU Yue, YU Tao. Mathematical relation between network topology and power supply reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 168-175.

[31] 石方迪，侯四维，唐琪，等. 世界一流城市配电网典型接线模式的评估及选型方法[J]. 电网技术，2022，46(6)：2249-2258.
SHI Fangdi, HOU Siwei, TANG Qi, et al. Evaluation and selection of typical connection modes for world-class urban distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2249-2258.

[32] 阮前途，谢伟，张征，等. 钻石型配电网升级改造研究与实践[J]. 中国电力，2020，53(6)：1-7，63.
RUAN Qiantu, XIE Wei, ZHANG Zheng, et al. Research and practice on the upgrading for diamond distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 1-7, 63.

[33] 陈维江，靳晓凌，吴鸣，等. 双碳目标下我国配电网形态快速演进的思考[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6811-6817.
CHEN Weijiang, JIN Xiaoling, WU Ming, et al. Thinking on the rapid evolution of distribution network form under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6811-6817.

[34] 宋若晨，袁明瀚，仇成. 上海城市配电网分层架构中应用“开关站链”模式的可靠性优化策略[J]. 电网技术，2022，46(11)：4466-4472.
SONG Ruochen, YUAN Minghan, QIU Cheng. Reliability upgrade strategy with application of switch station chain mode in layered architecture of shanghai electricity distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4466-4472.

[35] 王哲，段佳莉，何平，等. 城市中压配电网雪花格式网架结构初探[J]. 电力系统及其自动化学报，2024，36(9)：51-60.
WANG Zhe, DUAN Jiali, HE Ping, et al. Exploration on snow-shaped grid structure of urban medium-voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(9): 51-60.

[36] 张伟，张波，刘苑红，等. 现代智慧配电网新型网架结构思考与建议[J]. 供用电，2025，42(6)：85-92，103.
ZHANG Wei, ZHANG Bo, LIU Yuanhong, et al. Thoughts and suggestions on new grid structure of modern intelligent distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(6): 85-92, 103.

[37] 王成山，季节，冀浩然，等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化，2022，46(4)：1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.

[38] 刘文龙，吕志鹏，刘海涛. 电力电子化配电台区形态发展以及运行控制技术综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(13)：4899-4921.
LIU Wenlong, LÜ Zhipeng, LIU Haitao. An overview of morphological development and operation control technology of power electronics dominated distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 4899-4921.

[39] 赵毅，于继来. 多微网智能配电系统协同自律运控模式初探[J]. 电网技术，2018，42(4)：1200-1209.
ZHAO Yi, YU Jilai. Preliminary research on operation and control model of coordination and self-discipline for smart distribution system with multi microgrids[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1200-1209.

[40] 吴睿行，刘丽军，林锟，等. 考虑虚拟储能参与的多微网混合博弈运行策略[J]. 电网技术，2026，50(3)：1152-1161.
WU Ruixing, LIU Lijun, LIN Kun, et al. Multi-microgrid hybrid game operation strategy considering virtual energy storage participation[J]. Power System Technology, 2026, 50(3): 1152-1161.

[41] 吕天光，艾芊，孙树敏，等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. 中国电机工程学报，2016，36(1)：122-132.
LÜ Tianguang, AI Qian, SUN Shumin, et al. Behavioural analysis and optimal operation of active distribution system with multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 122-132.

[42] 李菀晴，贾燕冰，韩肖清，等. 含共用热电供给站的多微能网架构及容量规划[J/OL]. 电网技术，2025：1-13[2025-07-07]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2069.
LI Wanqing, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing, et al. Multi-micro energy

network architecture and capacity planning with shared heat and electricity supply station[J/OL]. Power System Technology, 2025: 1-13[2025-07-07]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2069.

[43] LI Z M, WU L, XU Y, et al. Multi-stage real-time operation of a multi-energy microgrid with electrical and thermal energy storage assets: a data-driven MPC-ADP approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 213-226.

[44] ZHOU Y Z, ZHAI Q Z, XU Z B, et al. Multi-stage adaptive stochastic-robust scheduling method with affine decision policies for hydrogen-based multi-energy microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(3): 2738-2750.

[45] 陈飞雄，黄恬浩，邵振国，等. 基于多参数规划的多能微网在线策略集计算与决策方法[J/OL]. 电网技术，2025：1-18[2025-07-07]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst. 2025.0424.
CHEN Feixiong, HUANG Tianhao, SHAO Zhenguo, et al. Online strategy set calculation and decision-making method for multi-energy microgrid based on multi-parametric programming[J/OL]. Power System Technology, 2025: 1-18[2025-07-07]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst. 2025.0424.

[46] 王玉彬，杨强，夏明超，等. 基于动态运行场景预测的多能微电网实时能量优化调控方法[J]. 电工技术学报，2026，41(7)：2237-2252.
WANG Yubin, YANG Qiang, XIA Mingchao, et al. A real-time energy optimal dispatch method for multi-energy microgrids based on dynamic operation scenario forecasting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(7): 2237-2252.

[47] 葛少云，刘帅，李荣超，等. 中压蜂巢状配电网结构研究及应用[J]. 山东电力技术，2023，50(8)：1-10.
GE Shaoyun, LIU Shuai, LI Rongchao, et al. Research and application of medium voltage honeycomb distribution network structure[J]. Shandong Electric Power Technology, 2023, 50(8): 1-10.

[48] 祖国强，王蕾，肖峻，等. 蜂巢配电网的核心特征、关键问题与研究思路[J]. 电力系统自动化，2022，46(11)：1-10.
ZU Guoqiang, WANG Lei, XIAO Jun, et al. Core features, key issues and research ideas of honeycomb distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 1-10.

[49] 肖峻，刚发运，蒋迅，等. 柔性配电网：定义、组网形态与运行方式[J]. 电网技术，2017，41(5)：1435-1442.
XIAO Jun, GANG Fayun, JIANG Xun, et al. Flexible distribution network: definition, morphology and operation mode[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1435-1442.

[50] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1899-1910.

[51] 贾善翔，彭克，李喜东，等. 基于智能软开关的柔性互联交直流配电系统分布式优化[J]. 电力系统自动化，2021，45(8)：95-103.
JIA Shanxiang, PENG Ke, LI Xidong, et al. Distributed optimization of flexible interconnected AC/DC distribution system based on soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 95-103.

[52] 吴岩，王玮，唐芬，等. 计及标幺化电压差值和功率裕度的多端口低压直流智能软开关双向下垂控制策略[J]. 电网技术，2025，49(10)：4353-4364.
WU Yan, WANG Wei, TANG Fen, et al. Bidirectional droop control strategy for multi-port low voltage DC soft open point considering normalized voltage difference and power margin[J]. Power System Technology, 2025, 49(10): 4353-4364.

[53] 王颖，马佳骏，王小君，等. 含智能软开关的配电网重要负荷恢复方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(8)：104-111.
WANG Ying, MA Jiajun, WANG Xiaojun, et al. Critical load restoration method for distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 104-111.

[54] 孙守晶，丛伟，邱吉福，等. 含智能软开关的智能配电网分布式供电恢复方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(8)：79-85.
SUN Shoujing, CONG Wei, QIU Jifu, et al. Distributed power restoration method for smart distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 79-85.

[55] 祖国强，宋晨辉，张春晖，等. 蜂巢状综合能源配电系统的组网结构与运行方式[J]. 电力系统自动化，2023，47(12)：47-55.
ZU Guoqiang, SONG Chenhui, ZHANG Chunhui, et al. Networking structures and operation modes of honeycomb integrated energy distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 47-55.

[56] 王成山，宋关羽，李鹏，等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化，2016，40(22)：168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.

[57] 王成山，王瑞，冀浩然，等. 多电压等级配电系统智能软开关协同配置[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6831-6843.
WANG Chengshan, WANG Rui, JI Haoran, et al. Coordinated allocation of SOP in multi-voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6831-6843.

[58] BLOEMINK J M, GREEN T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 911-919.

[59] 王成山，李鹏，于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化，2018，42(10)：13-21.
WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21.

[60] 江道灼，徐宁，江崇熙，等. 蜂巢状有源配电网构想、关键技术与展望[J]. 电力系统自动化，2019，43(17)：1-11.
JIANG Daozhuo, XU Ning, JIANG Chongxi, et al. Conception, key technology and prospect of honeycomb-shape active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 1-11.

[61] 刘洪，李其哲，徐晶，等. 网孔型中压配电网组网形态、核心特征与研究展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(16)：181-191.
LIU Hong, LI Qizhe, XU Jing, et al. Networking morphology, key feature and research prospect of mesh-type medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 181-191.

[62] 李洋，王鹤，何荣富，等. 考虑安全运行边界的低压配电交直流组网控制策略及工程应用[J/OL]. 中国电机工程学报，2025：1-14 [2025-07-10]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250411.
LI Yang, WANG He, HE Rongfu, et al. Control strategy and engineering application of low-voltage distribution AC-DC network considering safe operating boundary[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-14[2025-07-10]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.250411.

[63] 刘海涛，董新洲，熊雄，等. 基于低压柔直的末端电网能源互联与能量微循环系统[J]. 电力系统自动化，2023，47(6)：40-47.
LIU Haitao, DONG Xinzhou, XIONG Xiong, et al. Energy interconnection and energy microcirculation system of terminal power grid based on low-voltage flexible DC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 40-47.

[64] 魏志文，罗煜，曾远方，等. 中压配电网柔性互联示范工程技术方案设计[J]. 电力建设，2022，43(3)：1-11.

WEI Zhiwen, LUO Yu, ZENG Yuanfang, et al. Technical scheme design of an MVAC distribution network project for demonstration with MVDC-flexible interconnection[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 1-11.

[65] 祁琪，姜齐荣，许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术，2020，44(12)：4664-4676.
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.

[66] 徐旖旎，刘海涛，熊雄，等. 低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. 中国电机工程学报，2022，42(11)：3986-4000.
XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3986-4000.

[67] ZHANG L, LIANG J, TANG W, et al. Converting AC distribution lines to DC to increase transfer capacities and DG penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1477-1487.

[68] 唐巍，张起铭，张璐，等. 新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. 电力系统自动化，2023，47(6)：2-17.
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17.

[69] 江道灼，郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化，2012，36(8)：98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.

[70] 宋强，赵彪，刘文华，等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报，2013，33(25)：9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.

[71] 梁永亮，吴跃斌，马钊，等. 新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析及发展展望[J]. 中国电机工程学报，2021，41(1)：13-24.
LIANG Yongliang, WU Yuebin, MA Zhao, et al. Application and development prospect of new generation of LVDC supply and utilization system in “new infrastructure”[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 13-24.

[72] QI S G, GONG X, LI S. Study on power feeding system for 5G network[C]//2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference. Turino, Italy: IEEE, 2018: 1-4.

[73] 马钊，赵志刚，孙媛媛，等. 新一代低压直流供用电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化，2019，43(23)：12-22.
MA Zhao, ZHAO Zhigang, SUN Yuanyuan, et al. Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 12-22.

[74] 赵书慷，孙媛媛，马钊，等. 新一代低压直流供用电系统多工作模式下能量协调控制策略[J]. 电网技术，2024，48(8)：3483-3492.
ZHAO Shukang, SUN Yuanyuan, MA Zhao, et al. Energy coordination control strategy for low voltage direct current supply and utilization system with multiple operating modes[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3483-3492.

[75] 谢敏，张世平，李弋升，等. 基于多模式柔性互联的交直流低压配电网优化调度[J]. 电力系统自动化，2023，47(6)：79-89.
XIE Min, ZHANG Shiping, LI Yisheng, et al. Optimal dispatch of AC/DC hybrid low-voltage distribution network based on multi-mode flexible interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 79-89.

[76] 司金冬，吴熙，郭其胜，等. 面向高比例新能源消纳的地区电网柔性互联规划与运行技术综述[J]. 电网技术，2024，48(6)：2272-2286.
SI Jindong, WU Xi, GUO Qisheng, et al. Review of flexible interconnection of regional grids interconnection planning and operation techniques for high percentage of renewable energy consumption[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2272-2286.

[77] 杨策，孙伟卿，韩冬. 考虑新能源消纳能力的电力系统灵活性评估方法[J]. 电网技术，2023，47(1)：338-346.
YANG Ce, SUN Weiqing, HAN Dong. Power system flexibility evaluation considering renewable energy accommodation[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 338-346.

[78] 吕婉煜，赵红生，韩应生，等. 供需不确定性下抽水蓄能提升系统灵活性的分层优化调度[J]. 电工技术学报，2025，40(21)：6984-6999.
LÜ Wanyu, ZHAO Hongsheng, HAN Yingsheng, et al. Hierarchical optimal scheduling for pumped storage to enhance system flexibility under supply-demand uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(21): 6984-6999.

[79] 张皓南，何川，刘天琪，等. 考虑水光多时间尺度不确定性与互补分组分群接入的清洁能源电力系统扩展规划方法[J]. 电网技术，2025，49(9)：3710-3720.
ZHANG Haonan, HE Chuan, LIU Tianqi, et al. Expansion planning method of clean energy power system considering hydropower-photovoltaic multi-time scale uncertainty and complementarity cluster access[J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3710-3720.

[80] 马英浩，刘琛，谢开贵，等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(14)：5429-5440.
MA Yinghao, LIU Chen, XIE Kaigui, et al. Review on network transmission flexibility of power system and its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5429-5440.

[81] 刘帅，李华强，武姝凝，等. 考虑灵活性资源传输精细化建模的配电网优化运行[J]. 电网技术，2025，49(5)：2024-2034.
LIU Shuai, LI Huaqiang, WU Shuning, et al. Optimal operation of distribution network considering refined modeling of flexible resource transmission[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 2024-2034.

[82] 雷雪姣，潘士娟，管晓宏，等. 考虑传输安全裕度的电力系统发电经济调度[J]. 中国电机工程学报，2014，34(31)：5651-5658.
LEI Xuejiao, PAN Shijuan, GUAN Xiaohong, et al. Transmission safety margin constrained unit commitment in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5651-5658.

[83] 周文毅，高红均，郭明浩，等. 考虑历史数据筛选及关键断面约束的电力系统运行灵活性评估方法[J]. 高电压技术，2025，51(1)：180-190.
ZHOU Wenyi, GAO Hongjun, GUO Minghao, et al. Operational flexibility evaluation method of power system considering historical data screening and key section constraints[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 180-190.

[84] 宁世超，吕林，刘友波，等. 高渗透率风电接入下地区高压电网转供模型[J]. 电力自动化设备，2018，38(6)：46-54.
NING Shichao, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Transfer model of regional high-voltage power system containing high penetration of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 46-54.

[85] 刘友波，曾宇，张曦，等. 城市高压配电网负荷转供辅助决策关键技术与系统[J]. 电力自动化设备，2023，43(10)：192-199.
LIU Youbo, ZENG Yu, ZHANG Xi, et al. Key technology and system for auxiliary decision-making of load transfer in urban high voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023,

43(10): 192-199.

[86] 吴熙，王银花，司金冬，等. 基于拓扑-功率传输关系的柔性互联选址定容[J]. 电力系统自动化，2025，49(23)：48-56.
WU Xi, WANG Yinhua, SI Jindong, et al. Siting and sizing for flexible interconnection based on relationship between topology and power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(23): 48-56.

[87] 祁万春，杨林，宋鹏程，等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术，2016，40(1)：92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing western power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.

[88] 陈昕奕，柳璐，张啸虎，等. 典型与极端场景下考虑煤电机组转型的灵活性资源协同规划[J]. 中国电机工程学报，2025，45(23)：9099-9111.
CHEN Xinyi, LIU Lu, ZHANG Xiaohu, et al. Collaborative planning of flexible resources considering the transformation of coal-fired units in typical and extreme scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9099-9111.

[89] 肖峻，伊丽达，郭伟，等. 城市电网分区柔性互联的概念与示范工程论证[J]. 供用电，2016，33(8)：2-6，56.
XIAO Jun, YI Lida, GUO Wei, et al. The concept and demonstration project of flexible interconnection of urban power grid partition[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(8): 2-6, 56.

[90] 余潇潇，张璞，张凯. 柔性直流背靠背装置在北京配电网中的应用[J]. 电力建设，2016，37(5)：132-137.
YU Xiaoxiao, ZHANG Pu, ZHANG Kai. Application of VSC-HVDC back-to-back device in Beijing distribution network[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 132-137.

[91] 纳西姆·尼古拉斯·塔勒布. 反脆弱：从不确定性中获益[M]. 雨珂，译. 北京：中信出版社，2014.
TALEB N N. Antifragile: things that gain from disorder[M]. YU Ke, translated. Beijing, China: China CITIC Press, 2014.

[92] 梅生伟，王莹莹. 输电网-配电网-微电网三级电网规划的若干基础问题[J]. 电力科学与技术学报，2009，24(4)：3-11.
MEI Shengwei, WANG Yingying. Several basic problems of three-level power network planning of transmission network-distribution network-microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(4): 3-11.

[93] 余贻鑫，刘艳丽，秦超，等. 分层分群电网体系结构[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(22)：1-8.
YU Yixin, LIU Yanli, QIN Chao, et al. Layered and clustered grid architecture[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 1-8.

[94] BISTRITZ I, WARD A, ZHOU Z Y, et al. Smart greedy distributed energy allocation: a random games approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022, 67(5): 2208-2220.



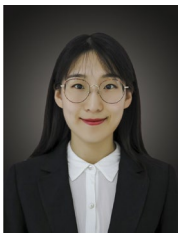
**许　寅**
1986—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为韧性电网、城市电网形态、城市电力交通耦合、电力系统高性能计算等
E-mail: xuyin@bjtu.edu.cn

XU Yin
Ph.D., Professor



**黄　力**
2002—，男，博士生
主要研究方向为城市电网形态等
E-mail: 25110555@bjtu.edu.cn

HUANG Li
Ph.D. candidate



**王　颖**(通信作者)
1992—，女，博士，副教授
主要研究方向为韧性电网、城市电网形态、配电网故障恢复、电力交通融合等
E-mail: wangyingl @bjtu.edu.cn

WANG Ying
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-11-01　在线出版日期　2026-04-16　　编辑　陈　蔓