

# 城市配电网柔性互联关键技术及应用前景

于洪宇

国网阜新供电公司 辽宁 阜新 123000

**摘要:** 随着“双碳”战略目标的推进和新型电力系统的加速构建,高比例可再生能源接入、电动汽车规模化发展以及用户侧用能需求日益多样化,对传统城市配电网提出了前所未有的挑战。传统辐射状、刚性结构的配电网在灵活性、可靠性、经济性和智能化方面已难以满足未来城市能源系统的发展需求。在此背景下,柔性互联技术作为提升配电网运行灵活性与智能化水平的关键手段,受到广泛关注。本文系统梳理了城市配电网柔性互联的核心内涵,深入分析了其关键技术体系,包括基于电力电子的柔性互联装置(如智能软开关SOP、背靠背变流器等)、多端口能量路由器、分布式协同控制策略、数字孪生与人工智能融合技术等;最后,展望了柔性互联技术在新型城市能源互联网中的发展前景,并提出若干技术挑战与政策建议,以期为我国城市配电网高质量发展提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 城市配电网; 柔性互联; 智能软开关; 电力电子变压器; 分布式协同控制; 数字孪生; 能源互联网

## 引言

城市配电网作为连接主网与终端用户的“最后一公里”,是保障城市能源安全、支撑经济社会发展的关键基础设施。近年来,随着以光伏、风电为代表的分布式可再生能源大量接入,以及电动汽车、储能系统、数据中心等新型负荷的快速增长,城市配电网呈现出“源-网-荷-储”高度耦合、双向潮流频繁、运行状态复杂多变等新特征。传统以单向潮流、被动管理为特征的配电网架构,在应对上述变化时暴露出诸多问题:(1)潮流调控能力弱:难以主动调节馈线间功率流动,易出现局部过载或轻载;(2)可再生能源消纳受限:受制于网络拓扑与电压约束,分布式电源出力常被弃用;(3)供电可靠性不足:故障隔离与恢复依赖机械开关,响应速度慢,自愈能力有限;(4)资产利用率低:部分线路长期轻载,而相邻线路却重载,资源未有效协同。为破解上述难题,学术界与工业界提出“柔性互联”理念,即通过先进电力电子装备与智能控制技术,打破传统配电网物理隔离的刚性边界,实现多馈线、多区域之间的灵活、可控、高效能量交互。柔性互联不仅是一种技术手段,更代表了一种从“被动适应”向“主动引导”转变的配电网运行范式革新。

### 1 柔性互联的基本概念

城市配电网柔性互联是指利用基于全控型电力电子器件的智能装备,在中压或低压配电网的不同馈线、不同区域之间建立可控的能量交换通道,实现功率的按需、精准、快速调度,从而提升配电网的灵活性、韧性与智能化水平。其核心在于“柔性”——即对功率流动方向、大小、速率的动态可控性,区别于传统联络开关

仅能实现“通/断”两种状态的刚性连接。

## 2 柔性互联关键技术体系

### 2.1 柔性互联核心装备

#### 2.1.1 智能软开关

智能软开关(SOP)是当前柔性互联技术中最具代表性的核心装备,通常由背靠背电压源型变流器(VSC)构成,部署于传统常开联络开关的位置。与机械开关只能实现“断开”或“闭合”两种状态不同,SOP能够对馈线间的有功功率和无功功率进行四象限独立、连续、快速的调节。这一特性使其不仅具备能量调度功能,还能提供动态电压支撑、谐波抑制、不平衡补偿等电能质量治理能力。在发生短路故障时,SOP可通过快速闭锁故障侧端口并调整非故障侧输出,实现非故障区域的无缝供电恢复,大幅缩短停电时间<sup>[1]</sup>。目前,SOP的拓扑结构已从早期的两电平、三电平发展到模块化多电平(MMC)形式,后者凭借更低的开关损耗、更高的输出电压质量以及更强的故障穿越能力,在中压配电网应用中展现出显著优势,正逐步成为工程实践的主流选择。

#### 2.1.2 电力电子变压器与能量路由器

电力电子变压器(PET)作为融合高频磁技术与全控型功率器件的新型装备,集成了传统工频变压器的电压变换、电气隔离功能与现代变流器的灵活控制能力。它不仅能实现交流到交流的高效变换,还可提供直流端口,天然适配光伏、储能、电动汽车充电桩等直流设备的接入需求。基于PET进一步发展而来的多端口能量路由器,可同时连接多条交流馈线、直流母线、分布式电源及储能系统,形成一个多功能、高集成度的能量枢纽节点。这种节点不仅支持交直流混合配电,还能根据系

统运行状态和用户需求,智能调度不同端口间的能量流动,实现“源-网-荷-储”的协同优化。在未来的城市配电网中,能量路由器有望成为构建“光储直柔”建筑群、园区级综合能源系统的关键物理载体。

### 2.1.3 直流配电与混合配电技术

柔性互联技术的效能往往在交直流混合配电架构下得到最大发挥。相较于交流系统,直流配电无需考虑频率同步与无功功率问题,线路损耗更低,且更易于与分布式电源和储能系统直接耦合。通过在关键节点部署AC/DC或DC/DC变流器,可以构建局部直流微网,并通过柔性互联装置与主交流配电网实现双向能量交互。这种混合架构不仅提升了能量传输效率,还增强了系统对波动性电源和冲击性负荷的适应能力。例如,在商业楼宇密集区,可建立直流母线汇集屋顶光伏与储能,再通过柔性互联装置将富余电能灵活注入周边交流馈线,实现区域内资源的最优配置。

## 2.2 协同控制与优化调度技术

### 2.2.1 分布式协同控制策略

柔性互联系统的控制不能依赖传统的集中式调度模式,因其对通信可靠性和计算中心的依赖过高,难以适应配电网点多面广、动态性强的特点。因此,分层分布式控制架构成为主流方向。在本地层,各柔性互联装置(如SOP或PET)基于下垂控制、虚拟阻抗等自主控制策略,实现对本地电压、频率和功率的快速响应,确保基本运行稳定<sup>[2]</sup>。在区域协调层,多个柔性互联节点通过多智能体系统(MAS)或一致性算法进行信息交互与协同决策,共同完成馈线负载均衡、无功优化等任务,无需全局中央控制器。而在全局优化层,则结合配电网的状态估计结果和日前/实时调度计划,生成最优的功率设定指令下发至各区域节点。这种“自主+协同+优化”的三层控制体系,既保证了系统的鲁棒性与实时性,又兼顾了全局运行的经济性与安全性。

### 2.2.2 多时间尺度优化调度

柔性互联系统的运行优化需覆盖从秒级到日级的多个时间尺度。在日前阶段,系统基于对次日负荷和新能源出力的预测,制定SOP的功率设定计划,以最小化购电成本和网络损耗为目标,同时满足设备容量和电压约束。进入日内阶段,随着超短期预测精度的提升,调度中心对日前计划进行滚动修正,以应对预测偏差。而在实时控制层面,系统需在秒级甚至毫秒级内响应光伏出力突变或负荷跳变等扰动,通过快速调整柔性互联装置输出,维持系统电压稳定和潮流平衡。考虑到新能源与负荷固有的不确定性,优化模型常采用鲁棒优化、随

机规划或分布鲁棒优化等方法,以在保证安全的前提下最大化系统运行效益。

## 2.3 数字孪生与人工智能融合技术

数字孪生技术为柔性互联系统提供了高保真、实时同步的虚拟映射环境,使得“先仿真、后执行”的闭环控制成为可能。在此基础上,人工智能技术的深度融入进一步提升了系统的认知与决策能力。例如,利用长短期记忆网络(LSTM)或Transformer模型,可对区域内的负荷曲线和光伏出力进行高精度超短期预测,为优化调度提供可靠输入;基于深度强化学习(DRL)的控制策略则能在复杂、动态的环境中自主探索最优动作序列,实现在线自适应控制;而图神经网络(GNN)则能有效建模配电网的拓扑结构与电气关系,显著提升状态估计和故障定位的准确性。AI与数字孪生的融合,正在推动柔性互联系统从“自动化”向“智能化”跃迁,形成具备感知、认知、决策与执行一体化能力的新型配电运行范式。

## 2.4 安全防护与标准化体系

随着柔性互联技术引入大量电力电子设备和高速通信接口,系统的网络安全风险显著增加。一旦遭受网络攻击,可能导致控制指令被篡改、设备误动作甚至大面积停电。因此,必须构建覆盖“云-边-端”全链条的安全防护体系,包括设备身份认证、通信加密、异常行为检测与隔离机制等。同时,缺乏统一的技术标准已成为制约柔性互联规模化推广的重要瓶颈<sup>[3]</sup>。当前,不同厂商的SOP、PET在接口协议、控制逻辑、保护定值等方面存在较大差异,导致系统集成困难、运维复杂。亟需加快制定涵盖设备性能、并网要求、通信规约、测试方法等方面的国家标准或行业规范,如对IEC61850标准进行扩展以支持柔性互联设备建模,或完善IEEE1547.1对分布式电源与柔性装置协同运行的要求,从而为产业健康发展奠定基础。

## 3 应用前景与挑战

### 3.1 发展前景

展望未来,柔性互联技术将在构建新型城市能源系统中扮演愈发关键的角色。它不仅是新一代智能配电网的核心物理架构,更是实现“主网-配网-微网”多层级协同、交直流混合组网、源网荷储高效互动的基础支撑。随着技术成熟与成本下降,柔性互联节点将逐步从示范工程走向规模化部署,成为城市能源互联网的关键使能设施。同时,其与5G、边缘计算、区块链等新兴技术的深度融合,将推动配电网向“透明、自治、弹性”的数字电网演进。更重要的是,在国家“双碳”战略指引

下,柔性互联通过提升绿电消纳比例、降低系统能耗、支撑碳计量与交易,将成为城市实现碳中和目标不可或缺的技术工具。预计到2030年,我国主要城市群的核心区域将普遍形成以柔性互联为骨干的现代化智能配电网体系。

### 3.2 面临挑战

尽管前景广阔,柔性互联的大规模推广应用仍面临一系列现实挑战。首先是经济性问题,当前基于IGBT或SiC器件的柔性互联装备初始投资成本仍然较高,其全生命周期的经济收益需通过精细化的效益评估模型来验证,以增强电网企业和社会资本的投资信心。其次是标准体系的缺失,设备接口、控制协议、保护配合等关键环节缺乏统一规范,导致不同厂商产品难以互联互通,增加了系统集成与后期运维的复杂度。再次,大规模、高渗透率柔性互联系统的长期运行特性、稳定性边界及与传统保护系统的协调机制尚不完全明确,需要积累更多实证数据。此外,现行电力市场机制尚未充分认可柔性调节能力的价值,缺乏合理的定价与补偿机制,制约了其参与辅助服务市场的积极性。最后,高度依赖通信与控制的特性也带来了新的网络安全风险,如何构建内生安全、抗攻击能力强的柔性互联系统,是必须解决的重大课题。

### 4 政策建议与发展方向

为加速柔性互联技术从示范走向普及,亟需多方协同发力。在顶层设计层面,应将柔性互联明确纳入国家和地方的配电网发展规划,制定清晰的技术路线图和发展目标。在标准建设方面,需加快制定涵盖SOP、PET等核心装备的技术规范、并网标准和测试认证体系,推动产业生态健康发展。在工程实践上,建议在京津冀、长三角、粤港澳大湾区等负荷密集、新能源发展迅速的城市群,开展更大规模、更高集成度的柔性互联示范工程建设,积累运行经验。在商业模式上,可探索“设备租赁+服务分成”、“容量共享”、“调节能力聚合”等创

新机制,降低用户侧投资门槛<sup>[4]</sup>。在市场机制上,应尽快将柔性互联提供的调峰、调压、备用等调节能力纳入辅助服务市场,并建立容量补偿机制,充分体现其系统价值。未来的研究重点应聚焦于开发高性价比、高可靠性的新一代柔性互联装备,特别是基于宽禁带半导体(如SiC、GaN)的高效拓扑;深化面向海量分布式资源的集群协同控制理论;研究极端灾害场景下的韧性提升策略;以及探索柔性互联与碳计量、绿证交易等机制的耦合优化方法。

### 5 结语

城市配电网柔性互联是应对能源转型、负荷变革与数字化浪潮的战略性技术路径。通过电力电子化、数字化与智能化深度融合,柔性互联打破了传统配电网的刚性约束,赋予其主动调控、灵活互动与自愈协同的能力。当前,以智能软开关、能量路由器为代表的装备已进入工程应用阶段,在提升可靠性、促进新能源消纳、优化资产利用等方面展现出显著价值。面向未来,柔性互联将进一步融入城市能源互联网生态,成为支撑“双碳”目标实现的关键基础设施。然而,其规模化推广仍需克服成本、标准、机制等多重障碍。唯有通过技术创新、标准引领、政策支持与市场驱动协同发力,方能释放柔性互联的最大潜能,构建安全、高效、绿色、智能的现代城市配电网。

### 参考文献

- [1]于洋.配电网柔性互联架构与运行研究[J].光源与照明,2025,(07):230-232.
- [2]侯凯,汤雨,过亮,等.现代智慧配电网柔性互联技术研究综述[J].电力自动化设备,2025,45(10):186-200.
- [3]贺芬芬,杨圣彬.配电网柔性互联装置的设计与工程应用[J].电子技术,2025,54(04):395-397.
- [4]符谢力,舒舟,吴万军.新型电力系统背景下配电网柔性互联容量自动提升系统研究[J].自动化与仪器仪表,2025,(01):247-252.