DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.004　　文章编号：2097-583X(2026)04-0542-09

# 面向新型电力系统的配电网关键技术研究综述

徐　昱[1]，陈新武[1]，张　昆[1]，刘宇洋[1]，吴宪军[2]，刘墨林[1*]

(1. 信阳师范大学 物理电子工程学院，河南 信阳 464000；
2. 信阳市谷麦光电子科技有限公司，河南 信阳 464000)

**摘　要：**分布式电源、电动汽车、储能等新型设备的大规模接入，使配电网从无源辐射状网络演变为有源多端网络，其规划、控制、保护与故障处置技术面临严峻挑战。从配电网规划、控保协同、故障检测与处置、关键设备等4个维度系统梳理研究进展。总结了源荷模拟、不确定性处理及智能规划的最新成果；分析了构网型/跟网型控制、保护原理适应性改进及直流配电网控保协同；评述了数据驱动检测和定位算法的现状与局限，以及光伏直流配电网中电力电子变换和固态变压器技术前沿。在此基础上，提炼了当前研究的共性空白，并展望了物理-数据融合、5G/TSN通信以及人工智能等未来方向。

**关键词：**新型电力系统；多元源荷储；控保协同；故障检测；直流配电网

**中图分类号：**TM7；TM46　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

# A review of key technologies for distribution networks in the context of new power systems

**Xu Yu[1], Chen Xinwu[1], Zhang Kun[1], Liu Yuyang[1], Wu Xianjun[2], Liu Molin[1*]**

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;
2. Xinyang Gumai Optoelectronic Technology Co., Ltd., Xinyang 464000, China)

**Abstract:** The large-scale integration of distributed generation (DG), electric vehicles (EV), energy storage systems (ESS), and other emerging devices had transformed the distribution network from a passive radial topology into an active multi-terminal network, posing significant challenges to its planning, control, protection, and fault handling technologies. Research progress was systematically reviewed from four dimensions: planning, control-protection coordination, fault detection/handling, and key equipment. Recent achievements in source-load simulation, uncertainty handling, and intelligent planning were summarized. Grid-forming/following control, protection adaptations and DC coordination were analyzed. The current status and limitations of data-driven detection and localization algorithms were reviewed, as well as the frontiers of power electronics and solid-state transformer technologies in photovoltaic DC distribution networks. Based on these results, common research gaps were identified, and future perspectives such as physical-data fusion, 5G/TSN communication and Artificial Intelligence were outlined.

**Key words:** new power system; multiple source-load-storage; control-protection coordination; fault detection; DC distribution networks

**收稿日期：**2026-07-27；**修回日期：**2026-08-16；*.**通信联系人，**E-mail：xuyu20084636@126.com；mlliu@xynu.edu.cn

**基金项目：**国家自然科学基金项目(62504197)；河南省科技攻关项目(242102221046)

**作者简介：**徐　昱(1989—)，男，河南信阳人，讲师，博士，主要从事测控技术与自动化装备、无线电力传输等方面的研究。

**引用格式：**徐昱，陈新武，张昆，等. 面向新型电力系统的配电网关键技术研究综述[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：542-550.

Xu Yu, Chen Xinwu, Zhang Kun, et al. A review of key technologies for distribution networks in the context of new power systems [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(4): 542-550.

## 0　引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是中国能源转型的核心战略,风电、光伏发电(以下简称“风光”)新能源装机创新高。配电网作为连接输电网与终端用户的关键枢纽,承担着分布式电源(Distributed Generation, DG)、电动汽车(Electric Vehicle, EV)、储能(Energy Storage System, ESS)等新型设备的接入与消纳任务。DG并入配电网已成为新型电力系统的重要特征,配电网结构由辐射状转变为多源多端网络架构,短路故障特性随之发生根本变化。传统配电网呈现“单向潮流、无源辐射、机电保护”的特征,而新型电力系统下的配电网则表现为“双向潮流、有源多端、电力电子化”的新形态,对规划、运行、保护、恢复等环节提出了更高技术要求[1-2]。

新能源强随机性、电力电子装备脆弱性及源网荷侧多重不确定性的交互影响[3],使故障特征复杂化,传统继电保护面临严峻挑战。继电保护正从基于工频稳态量的传统模式向依赖换流器可控性的控保协同方向演进。如何在源荷两侧强不确定性下实现经济性与可靠性的协同优化,成为规划核心议题[4]。

近年来,规划领域研究重心从网架扩展转向“源-网-荷-储”多要素协同[5],不确定性处理方法从随机规划、鲁棒优化到分布鲁棒优化递进演进[6],深度强化学习等人工智能方法也开始用于多阶段规划决策问题。在控制与保护协同领域,构网型控制技术因能够模拟同步发电机电压源外特性、为弱电网提供惯量与频率支撑而受到广泛关注[7],围绕其控制策略、故障穿越能力以及与现有保护原理的适配性已形成丰富的研究积累[8];距离保护的自适应整定、纵联保护的波形相关性判据等保护原理改进方案相继提出[9],为控保协同提供了多样化的实现路径。

在故障检测与处置领域,小波变换、数学形态学等信号处理方法在暂态特征提取方面展现出独特优势,图神经网络等深度学习方法也被引入故障识别与定位[10],然而数据驱动方法面临可解释性不足的根本困境,工程采纳率低。此外,随着分布式光伏渗透率持续攀升,高比例分布式光伏配电网在电力电子变换、固态变压器、直流组网等方面面临系统性挑战。

首先,从源荷模拟、灵活性资源协同及网架求解等多层面梳理配电网规划技术;进而围绕换流器控制、保护原理改进及直流与交直流场景下的控保协同方案,梳理运行控制与保护协同研究进展;随后,评述故障检测与定位技术现状;最后,总结高比例分布式光伏配电网在电力电子变换、固态变压器、直流组网等关键技术领域的进展。在此基础上提炼共性挑战,并对物理-数据融合、数字孪生、人工智能等未来方向进行展望,以期为新型电力系统配电网研究提供参考。

## 1　新型电力系统的内涵

新型电力系统是以新能源为供电主体、以电力电子化为技术特征、以源网荷储协同互动为运行模式的电力系统形态。新型电力系统具有以下核心内涵[1-3]:高比例新能源接入,风电、光伏等分布式电源大规模并网,发电出力呈现强间歇性与不确定性。高度电力电子化,新能源发电、储能、柔性直流等设备均通过电力电子换流器并网,系统惯性显著降低。源网荷储协同,传统“源随荷动”模式转变为“源网荷储”多元互动模式,需求侧响应成为可调控资源。运行方式变革,在新型电力系统背景下,配电网的角色从遵循“单向潮流、被动接入、机电保护”原则的传统模式,向遵循“双向潮流、有源多端、电力电子化”原则的新型模式发生深刻转变。

## 2　多元源荷接入的配电网规划

目前国内外学者已对多元源荷接入的配电网展开了研究,主要集中在源荷功率模拟、灵活性资源协同规划与求解算法等方面。

### 2.1　源荷功率模拟方法

源荷功率的精准模拟是配电网规划的基础环节。现有源荷功率模拟方法可分为模型驱动与数据驱动两大类。

(1) 模型驱动方法。传统源荷功率模拟主要依赖概率建模、模糊分析、区间分析和场景分析等模型驱动方法[5]。在电源侧,风光出力的概率特性通常基于Weibull分布和Beta分布建模,在负荷侧,正态分布可用于负荷、EV行驶里程和出行时间的建模[6]。模糊分析法通过构建合理的风光功率或气象要素的隶属度函数、盒式不确定集和三角模糊数来描述不确定性[7];场景分析法则基于不

确定性特征生成若干含有概率的确定性时序场景,通过自回归滑动平均模型生成时序运行状态[8]。尽管上述方法计算量小,但其存在主观性强、建模精度低等固有缺陷,难以准确刻画不确定性因素的高维非线性特征。

(2)数据驱动方法。与传统算法相比,神经网络等数据驱动方法能够在减少使用复杂数学原理的前提下深入挖掘变量间的非线性映射关系。Eom等[9]提出了基于多层感知机、卷积神经网络等构建组合预测模型的光伏年度发电量预测方法。在负荷功率模拟方面,Elman神经网络、长短期记忆网络、门控循环单元网络等[10]深度学习方法已被应用于中长期负荷预测。源荷功率模拟正从模型驱动向数据驱动演进,但数据驱动方法的精度依赖于海量高质量历史数据,而V2G、氢储能等新型设备缺乏运行数据。

### 2.2　灵活性资源协同规划模型

在不确定性环境下,各类灵活性资源的协同利用是应对源荷波动、提升规划方案适应性的关键手段。张家美等[4]基于灵活性定义与特征指标对光、车、氢的灵活性进行协同对比:分布式光伏爬坡速率快但备用功率受逆变器容量影响[11];EV具备能量存储能力,爬坡速率快,且具有空间上的灵活性[12];氢储能可提供更大容量更长时间的能量存储,但爬坡速率受电解槽温度、压强等制约。光-车协同利用EV的储能特性平抑光伏波动,在不敷设额外储能装备的同时为电网提供平稳的电能供应[13],但EV灵活性受用户行为限制;光-氢协同利用储氢罐的缓冲作用提供更长时间更大容量的备用供应[14];三者联合则可缓解EV因受制于用户行为而损失的那部分灵活性。Zhang等[15]提出了基于MPC的光-车-氢一体化站协同优化框架,通过滚动时域优化实现站内光伏、储能、制氢/加氢、EV充电的协调控制。Zhang等[16]进一步研究了气-液氢联合制储系统的经济调度方法,构建了考虑光-车-氢接入的城市配电网一般性规划模型。

### 2.3　规划求解算法

配电网规划求解算法目前可归纳为单层规划方法、多层规划方法、多阶段规划方法三类。多层规划方法按规划与运行等不同尺度或主体构建两层及以上优化模型,是处理源网协调的主流框架。杨楠等[17]根据配电网规划中的多利益主体建立多层优化模型,分析主体间的静态和动态博弈关系,结合迭代搜索法和极大极小值法求解纳什均衡点。金国彬等[18]提出了考虑可靠性的交直流混合配电网网架与分布式电源协同优化规划方法,有效兼顾了系统可靠性与经济性的协调统一。但多层规划方法模型规模较大、求解复杂度高、收敛速度慢。多阶段规划方法考虑经济、负荷等动态因素在规划期内的变化,动态制定配电网规划策略。吴志等[19]基于Benders分解方法对配电网多阶段规划主问题和配网重构运行子问题迭代求解;马艳霞等[20]将传统粒子群算法和快速非支配遗传算法相结合求解多阶段规划模型。但多阶段规划方法模型构建与求解复杂度随阶段数增加呈指数增长。深度强化学习有望克服传统方法在处理大状态空间策略集时的不足[21]。

### 2.4　人工智能在配电网规划中的应用

人工智能的引入为配电网规划提供了新的解决路径,深度强化学习(Deep Reinforcement Learning,DRL)是当前配电网智能规划领域的研究热点。胡维昊等[22]指出,深度强化学习能够天然地处理多阶段决策问题,通过动态调整策略适应规划期内负荷增长、政策变化等不确定因素。针对配电网量测不足且易受异常值干扰的问题,胡家祥等[23]提出将物理拓扑嵌入图神经网络(Graph Neural Network,GNN)的抗差状态估计方法,并引入全局图注意力机制聚合节点信息,在多拓扑场景下具备更优的估计精度与抗差能力。在规划场景中,GNN可用于快速评估不同规划方案下的潮流分布、电压水平等关键指标,替代耗时的高精度潮流计算,从而大幅提升规划方案的筛选效率[24]。智能优化算法与传统规划方法的结合仍是当前工程应用的主流。遗传算法、粒子群优化等启发式算法已广泛应用于分布式电源选址定容、网架扩展规划等场景。

综上,源荷模拟正从模型驱动向数据驱动演进,但受限于新型设备运行数据匮乏;光-车-氢协同规划体现了从单一资源向多资源协同的方法论跃升,但模型复杂度随不确定性维度增加而上升;多层协调规划的求解算法性能较好,但模型规模大、收敛慢;多阶段规划方法动态适应性强、精度高,但求解复杂度高。深度强化学习方法在配电网规划中展现出巨大潜力,但如何将数据驱动方法与物理约束有机结合,仍是值得探索的方向。

## 3　控制与保护协同

新型电力系统“双高”“双低”特性对传统以同步发电机为主导、以线性叠加原理为基础的继电保护原理构成严峻挑战,控制与保护在时间尺度上的差异逐渐缩小,控制与保护协同技术应运而生。

### 3.1　新能源并网换流器控制与保护协同

新能源并网换流器是实现控制与保护协同的核心载体。近年来,电网中新增的大量新能源机组多采用跟网型控制(Grid-Following Control,GFL)方式,削弱了系统的交流同步机制。构网型控制(Grid-Forming Control,GFM)技术可实现变流器作为等效电压源并网,能够有效为系统提供电压和频率支撑,并提升电网的惯量和阻尼特性[2]。两者的详细对比如表1所示。

闫晓伟等[25]提出风储联合控制策略,利用风机机械能提供虚拟惯量支撑,稳定电网频率。在光伏并网方面,GFM控制可解决功率过剩导致的电压波动问题,通过完全构网型与有限构网型控制的切换适应不同工况[26]。控保协同将保护的可靠性建立在对控制策略正确执行的依赖之上,目前GFM仍处于理论研究阶段,与保护结合的研究较少,关键在于GFM引入后的故障特征分析需要多维度全面考虑。

**表1　构网型控制(GFM)与跟网型控制(GFL)的对比**

**Tab. 1　Comparison between Grid-Forming control (GFM) and Grid-Following control (GFL)**

| 对比维度 | GFM | GFL |
|---|---|---|
| 本质 | 电压源 | 电流源 |
| 控制目标 | 电压幅值与频率 | 有功/无功功率 |
| 控制策略 | 下垂控制、虚拟同步发电机控制、虚拟振荡器控制 | PQ控制、定功率控制、定电流控制等 |
| 适应性 | 弱电网至强电网 | 仅强电网 |
| 惯量支撑 | 可提供虚拟惯量 | 无 |
| 故障响应 | 可主动控制故障电流相位/幅值 | 通常被动限流 |
| 典型应用 | 孤岛、弱电网、高比例新能源 | 强电网、常规并网 |

### 3.2　配电网保护原理的适应性改进

高比例新能源接入使传统交流配电网短路电流特征发生显著变化,传统的重合闸与电流三段式过流保护难以整定,控制与保护协同为保护原理的适应性改进提供了新途径[27]。目前协同下的保护原理改进方向可分为3种:电流/电压保护通过在线实时计算自适应阈值、距离保护利用新能源并网后故障电流相位可控的特点设置主动控制策略、纵联保护基于暂态电流波形相关性构造动作判据。杨乐等[28]提出的全周期限流控制策略,可在故障不同时期切换限流环节,使基于Pearson相关性的故障判别方案易于实现。宋国兵等[29]基于混合式MMC设计的主动限流控制策略,在限流的同时改进故障电流极性特征序列。朱孟兆等[30]针对潮流频繁切换场景,提出计及变压器健康运行的配电网综合调控策略。余光正等[31]构建了包含源荷相似度、可调能源占比等指标的自平衡能力评价体系。

### 3.3　直流与交直流混合配电网的控制与保护协同

徐全等[32]提出基于同步量测的直流配网“站-线-变-户”部署态势感知控制与保护技术,实现稳态、动态、暂态3个层面的态势感知与主动支撑。王华昕等[33]提出基于IGBT旁路投切的触电保护方法,通过故障阈值识别判据,在两点故障时快速导通旁路将流经人体电流从400 mA降至30 mA以下。张兆云等[34]发现直流侧故障会导致非特征谐波侵入交流侧,交流侧故障也会引起直流换相失败。这种交直流相互作用对保护配置提出了更高要求。郑涛等[35]提出的基于时序配合的后备保护方案,利用本地电流突变量极性判断负荷开关动作时序实现故障定位,加速控制策略提升保护速动性。侯俊杰等[36]依据换流器对扰动的阶段性响应提出了分阶段的保护原理思路,为交直流混合配电网的控保协同提供了理论基础。可靠、低时延的通信是控制与保护协同实现的物理基础。

### 3.4　人工智能在配电网运行控制中的应用

配电网运行控制涉及电压调控、无功优化、网络重构等多个层面,具有决策变量多、约束复杂、源荷不确定性高等特点[37]。DRL在该领域取得了丰富研究成果。

(1) 在无功优化与电压控制方面,传统方法依

赖精确潮流模型与负荷预测,但新型电力系统强波动性使精确建模困难。荆渝等[38]考虑源荷不确定性,提出基于区间估计的多智能体强化学习电压滚动控制,将调度分解为日前-日内-实时多时间尺度调度,有效降低光伏波动影响。全欢等[39]针对配电网实时电压优化,采用约束型DRL,将潮流约束嵌入动作空间,在保证安全约束下快速生成控制策略。

(2) 在动态重构方面,传统重构方法计算量大且难以实时响应拓扑变化。胡维昊等[22]将重构建模为序贯决策问题,通过智能体与环境持续交互学习最优开关动作策略。

(3) 在储能调度方面,黄定威等[40]建立含风光储的削峰填谷多目标优化模型,用于改进多目标量子粒子群求解,在负荷方差、综合成本和污染处理成本等三方面均优于对比方法。郝文斌等[41]建立多目标优化模型,引入二阶锥松弛求解,建立多指标评估体系,采用组合赋权法得综合评分,并通过IEEE33节点仿真验证有效性。

综上,当前控制与保护协同研究已从传统保护改进向控制与保护深度融合演进,在GFM控制、故障穿越、直流保护等方面取得了进展,但GFM控制下的故障特征尚缺乏通用分析模型,控制与保护协同方案对系统稳定性的影响尚未充分评估。深度强化学习在无功优化、动态重构及储能调度等运行控制场景中展现出良好适应性,是提升配电网运行智能化水平的新途径,但人工智能方法的训练效率、策略可解释性及安全性仍有待提升。

## 4　故障诊断检测与处置

### 4.1　故障诊断检测技术的现状

当前故障诊断检测方法主要分为基于电气量阈值的传统方法、基于多端信号处理的检测方法以及基于数据驱动的智能检测三类[42]。

#### 4.1.1　传统故障诊断检测技术

传统基于电气量阈值的电流突变法和过流速断法等曾在简单辐射网中广泛应用。刘建华等[43]提出了一种通过检测电流上升率的变化来识别近区故障的馈线电流保护方法,但其整定依赖于特定系统参数。分布式电源接入后,配电网故障电流的幅值还要受DG类型、容量、接入位置及控制策略的共同影响,导致传统整定基础不复存在[44]。为克服传统方法的局限性,基于线路多端的电气量信息综合判断的故障精确定位方法应运而生。张兆云等[34]指出小波算法因其敏感的奇异性检测性能,能够从故障暂态信号中提取突变信息,可在ms级内检测到故障,但易受噪声干扰,阈值自适应能力弱。王瑞珏等[45]基于组合基础形态学分别利用膨胀侵蚀差分滤波器、闭合开隙差分滤波器检测短路故障、高阻抗电弧故障,能够在临界故障检测时间前完成检测,无须通信链路,然而对于极间短路故障尚未充分验证。

#### 4.1.2　基于人工智能的故障诊断技术

人工智能技术的引入为配电网故障检测提供了新手段。薛俊杰[46]利用时空图卷积网络与深度强化学习提取故障时空关联特征,在IEEE33节点系统中实现了94.6%的故障类型识别准确率,但训练依赖大量标注样本,实际故障数据稀缺。胡家祥等[23]将GNN与配电网拓扑结构相结合,通过在图上的信息传递提取故障的时空关联特征,更贴合配电网的物理本质,在故障类型识别和区段定位方面准确率更高。张韶华[47]提出双流网络(DSN),并行提取空域与时域特征后融合自注意力机制,参数量减少,训练时间缩短35%,准确率达93.74%,但未考虑配电网拓扑结构,存在丢失节点电气连接关系的缺陷。

### 4.2　故障定位技术的进展

新型配电网故障定位研究可分为传统算法的改进(注入法、行波法、阻抗法)和新型算法(基于PMU、基于零序分量、基于人工智能)两大类。

#### 4.2.1　传统故障定位技术

(1)行波法利用故障暂态行波到达线路两端的时间差进行测距,不受系统参数、过渡电阻和故障类型影响。武骁等[48]利用故障行波固有频率与故障距离的确定关系实现定位,克服了传统行波法在多分支结构中波头辨识困难的缺陷。周泽华等[49]基于故障点虚拟映射建立行波信号衰减数学模型,联立故障分支判定矩阵逐步缩小故障区域,在多数定位装置失效时仍可精准定位。

(2)注入法通过向故障线路主动注入特征信号,分析响应信号特征参量实现故障定位。刘子奕等[50]利用换流器向柔性直流配电网故障线路注入可控小电流信号,通过计算测量点高频阻抗来定位故障。薛士敏等[51]向环形直流微网线路注入特征信号并分析本地电气量响应计算故障距离,无须两端通信,但注入信号可能对系统产生干扰。

(3)阻抗法通过测量阻抗或导纳频率特性来识别故障位置。朱铮等[52]通过智能电表监测电流阶跃与对应电压变化计算馈线阻抗，可有效识别PEN线劣化和断线，无须额外硬件且成本极低，但仅适用于断线故障，在配电网短线路中的适用性尚需评估。

4.2.2　基于人工智能的故障定位技术

分布式电源的弱馈特性使传统测距方程失效，阻抗法、行波法、注入法在含DG配电网中适应性显著下降。人工智能方法通过学习故障样本中电气量模式与故障位置间的映射关系，实现复杂拓扑下故障区段的快速定位。王伟等[53]利用PMU数据在序网络中通过最小二乘识别故障线路，WSCC9和IEEE39系统平均误差<0.2%，但严重依赖PMU同步精度(<56 μs)。马宝娟等[54]提出5G LAN+TSN优化组网方案和D2D+Mesh融合组网方案，引入鲸鱼优化算法实现含DG的故障区段定位。

综上，传统电流保护和信号处理方法分别受限于DG弱馈特性和抗噪能力，深度学习方法精度高但可解释性差、泛化难；行波法波头辨识困难，注入法依赖换流器；阻抗法难以适应DG随机出力；人工智能方法可实现复杂拓扑下快速判别，但可解释性不足。当前研究存在“检测—定位—隔离”环节割裂、数据驱动与物理模型融合不足等问题。

## 5　高比例分布式光伏配电网关键技术

高比例分布式光伏的接入改变了配电网的潮流分布，使配电网的源端呈现强间歇性、强随机性和高度电力电子化的新特征，对配电网的电力电子变换技术、固态变压器、直流组网技术提出了系统性挑战。

### 5.1　电力电子变换技术

电力电子变换技术是新型配电网实现电能灵活变换与高效调控的核心支撑，主要包括并网变换器与直流DC-DC变换器两大类。

5.1.1　并网变换器

并网变换器是分布式光伏、储能与配电网之间的关键接口。Reveles-Miranda等[55]提出基于无源理论的电流控制环与PI电压控制环相结合的控制方案，实现间歇发电条件下的持续运行，显著降低谐波畸变。Zhang等[56]提出基于连续控制集模型预测控制结合双二阶广义积分器锁相环的方法，用于维持光伏并网阻抗突变时系统稳定。王潇爽等[57]提出构网型两级式储能变换器协调控制策略，利用直流母线电容提供惯量支撑。杨新华等[58]提出了储能变流器并网/离网模式无缝切换控制策略，确保切换时对负荷的持续性供电。

5.1.2　直流DC-DC变换器

直流DC-DC变换器是直流配电网的核心装备。林霖等[59]提出混合式隔离型模块化多电平变换器拓扑，适用于中压直流配电网。苏冰等[60]提出基于耦合电感的多相交错并联双向DC-DC变换器及其均流控制策略。聂永刚等[61]提出基于虚拟惯量的DC换流器并联直流配电网控制策略，提升多换流器并联运行稳定性。蒋谦等[62]提出基于价值函数独立优化的模型预测控制策略，有效提升模块化多电平换流器型DC-DC变换器性能。

### 5.2　固态变压器

固态变压器(Solid-State Transformer，SST)将电力电子变换器与高频变压器相结合，实现电压变换、功率调节、无功补偿及交直流多端口接口等功能。

在拓扑方面，孙毅超等[63]提出功率复合型模块化多电平固态变压器拓扑，使功率变换级数从3级减少为2.5级。Zhuang等[64]提出多端口直流固态变压器技术，将多个分布式能源和直流负载接入中压直流母线，利用LC支路解决模块间电压不平衡问题。Lillo等[65]提出基于模块化变换器族的SST拓扑，采用集中式大功率中频变压器提升功率密度。

在控制方面，张文杰等[66]提出基于SST的交直流混合配电系统协调运行控制策略，无须通信即可实现多模式无缝切换。Bhawal等[67]提出三级SST系统闭环控制架构，合理搭配Si IGBT与SiC MOSFET，使中压级半导体损耗降低50%以上。

### 5.3　直流组网技术

含高比例分布式光伏配电网通过直流配电网进行汇集与消纳，可省去多级交直流转换环节，提升能源利用效率。直流组网技术主要涉及拓扑结构、关键设备和协调控制(关键设备见5.1、5.2节)。

5.3.1　直流组网的拓扑结构

针对含高比例分布式光伏的场景，直流组网典型拓扑主要分为辐射状、双端供电和环状三种形式。辐射状结构最为简单，但在含高比例分布

式光伏的场景中,其单向潮流特性难以适应光伏出力的波动;双端供电拓扑通过两端电源互为备用,显著提升了可靠性;环状拓扑将各节点连接成环形网络,任意单点故障均可通过网络重构恢复供电,可靠性最高,但控保最为复杂。在此基础上,多端网状结构进一步扩展了环状拓扑的灵活性,能够适应更复杂的分布式电源接入场景。在规划方法上,刘飞等[68]考虑光伏出力与负荷功率的不确定性,采用多目标粒子群与生成树算法对光伏接入容量与网架结构进行协同优化。

5.3.2　直流组网的协调控制

高比例分布式光伏的接入,使得运行控制面临多端口功率调节响应差异大、直流母线电压易波动等挑战。在多光伏协调控制方面,李付强等[69]针对功率均衡与调度问题提出分布式自适应功率协调控制策略,各单元均为可参与调度节点。刘瑜超等[70]采用长短期记忆网络预测光伏输出功率,基于分布式一致性Raft算法实现微电网功率协调与经济优化。在组网控制方面,王干等[71]提出无差分散式协调控制策略,结合主从控制优点,基于母线电压主动调节实现无通信协调控制。故障穿越方面,贾科等[72]提出多端口分布式光伏接入直流配电系统整体故障穿越协调控制方法,通过光伏端口电压调节的变功率控制使直流母线电压快速恢复至额定点值。

综上,含高比例分布式光伏配电网在电力电子变换、固态变压器、直流组网等关键技术领域取得了显著进展。并网变换器正从被动并网向主动支撑演进;直流DC-DC变换器正向模块化、多端口方向发展;固态变压器正向单级化、多端口化和智能化方向演进。然而,直流配电网的工程推广仍受制于直流断路器、故障隔离器件等关键装备的成熟度,如何实现多端口协调控制和故障快速隔离,仍是未来研究的重点方向。

## 6　总结与展望

新型电力系统背景下,配电网正从“无源辐射、单向潮流”向“有源多端、双向互动”转变。本文从配电网规划、控保协同、故障检测与处置、关键设备等4个维度,系统梳理了研究进展。

规划方面,源荷模拟正从模型驱动向数据驱动演进,但新型设备数据匮乏制约精度;不确定性处理虽从随机优化演进至分布鲁棒优化,但多将不确定性视为风险而非可利用资源;光-车-氢协同体现了从单一资源向多资源协同的方法论跃升,但模型复杂度随不确定性维度急剧上升。

控制与保护协同方面,GFM技术可为弱电网提供惯量与频率支撑,但多换流器并联环流及对控制策略的依赖使其可靠性面临挑战;直流保护更多依赖断路器硬件突破。

故障检测方面,传统电流保护和信号处理方法分别受限于DG弱馈特性和抗噪能力,深度学习方法精度高却面临可解释性不足与小样本泛化难题。“检测—定位—隔离”环节割裂、数据驱动与物理模型融合不足等共性问题仍待解决。

高比例分布式光伏配电网方面,并网变换器正从被动并网向主动支撑演进,固态变压器向多端口化、智能化发展,但直流断路器、故障隔离器件等装备成熟度仍是工程推广的主要瓶颈。

展望未来,应重点探索人工智能与物理模型的深度耦合,通过数字孪生实现控保协同从被动响应向主动防御转变,推动5G/TSN与配电保护深度融合,并建立标准化数据集与测试平台,弥合学术研究与工程应用之间的鸿沟。

**参考文献:**


[1] 罗旭,罗潇,温力力,等. 考虑新型设备的配电网规划研究综述[J]. 重庆大学学报,2023,46(1):35-45.
[2] 秦文萍,魏琦,蔡逸天,等. 高比例新能源并网下配电网控保协同技术综述[J]. 太原理工大学学报,2025,56(3):365-380.
[3] 赵鹏臻,谢宁,殷佳敏,等. 适应新型电力系统发展趋势的配电网集中-分布式形态及其分层分区方法[J]. 智慧电力,2023,51(1):94-100.
[4] 张家美,孙凯,李洪涛,等. 考虑光-车-氢接入的新型城市配电网规划研究综述与展望[J]. 高电压技术,2024,50(3):1067-1079.
[5] 孙建军,王灿,陈业伟,等. 新型配电网运行韧性综述与展望[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(9):919-929.
[6] 沈依婷,张菁,武鹏,等. 含电动汽车的配电网双重不确定性网架规划方法[J]. 中国电力,2020,53(4):139-146.
[7] 蔡佳铭,张涛,王承民,等. 计及源荷不确定性的主动配电网网架扩展柔性规划[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):109-115.
[8] 石玉东,刘晋源,徐松,等. 考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):23-32.
[9] Eom H, Son Y, Choi S. Feature-selective ensemble learning-based long-term regional PV generation forecasting[J].

IEEE Access,2020,8:54620-54630.
[10] Dong Ming,Grumbach L. A hybrid distribution feeder long-term load forecasting method based on sequence prediction [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(1):470-482.
[11] Gan Wei,Shahidehpour M,Yan Mingyu,et al. Coordinated planning of transportation and electric power networks with the proliferation of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(5):4005-4016.
[12] Yang Wentao,Liu Weijia,Chung C Y,et al. Joint planning of EV fast charging stations and power distribution systems with balanced traffic flow assignment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(3):1795-1809.
[13] Yan Qin,Zhang Bei,Kezunovic M. Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(2):2096-2106.
[14] Pan Guangsheng,Gu Wei,Lu Yuping,et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2020,11(4):2662-2676.
[15] Zhang Jiamei,Sun Kai,Li Canbing,et al. MPC-based co-optimization of an integrated PV-EV-Hydrogen station to reduce network loss and meet EV charging demand[J]. eTransportation,2023,15:100209.
[16] Zhang Jiamei,Sun Kai,Li Canbing,et al. Economic scheduling of gaseous-liquid hydrogen generation and storage plants considering complementarity of multiple products[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2023,11(1):223-233.
[17] 杨楠,董邦天,黄禹,等. 考虑不确定性和多主体博弈的增量配电网源网荷协同规划方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(9):2689-2702.
[18] 金国彬,刘玉龙,李国庆,等. 考虑可靠性的交直流混合配电网网架与分布式电源协同优化规划[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(22):59-70.
[19] 吴志,刘亚斐,顾伟,等. 基于改进Benders分解的储能、分布式电源与配电网多阶段规划[J]. 中国电机工程学报,2019,39(16):4705-4715.
[20] 马艳霞,车彬,孟旭红,等. 基于多目标的多阶段主动配电网规划方法分析[J]. 电网与清洁能源,2019,35(10):62-67.
[21] 王渝红,胡胜杰,宋雨妍,等. 基于强化学习理论的输电网扩展规划方法[J]. 电网技术,2021,45(7):2829-2838.
[22] 胡维昊,曹迪,黄琦,等. 深度强化学习在配电网优化运行中的应用[J]. 电力系统自动化,2023,47(14):174-191.
[23] 胡家祥,曹迪,胡维昊,等. 融入拓扑知识的图神经网络配电网抗差状态估计方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(10):84-97.
[24] 王小君,窦嘉铭,刘婴,等. 可解释人工智能在电力系统中的应用综述与展望[J]. 电力系统自动化,2024,48(4):169-191.
[25] 闫晓伟,王德顺,魏晓霞,等. 基于故障穿越与频率调节的风电-储能联合控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17):5911-5923.
[26] 郑玉平,吕鹏飞,李斌,等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]. 电力系统自动化,2023,47(22):3-15.
[27] 缪希仁,赵丹,刘晓明,等. 含分布式电源配电网短路保护研究综述[J]. 高电压技术,2023,49(7):3006-3019.
[28] 杨乐,秦文萍,陈晓乾,等. 基于限流控制与保护协同的柔性直流配电线路整体保护方案[J]. 电网技术,2022,46(12):4634-4644.
[29] 宋国兵,侯俊杰,郭冰,等. 计及主动故障限流策略的柔性直流电网纵联保护[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):123-131,138.
[30] 朱孟兆,黄莘杰,顾朝亮,等. 潮流频繁切换下计及变压器健康运行的新型电力系统配电网综合调控策略[J]. 电测与仪表,2026,63(5):38-48.
[31] 余光正,张俊杰,陈甜甜,等. 基于多准则决策分析的新型电力系统配电网自平衡能力评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(11):30-40.
[32] 徐全,雷金勇,袁智勇. 基于同步量测的配网态势感知技术在新型电力系统中应用与展望[J]. 南方电网技术,2023,17(1):136-143.
[33] 王华昕,刘健,邹龙,等. 新型电力系统下低压直流配网的接地故障保护方法[J]. 电测与仪表,2024,61(10):144-152.
[34] 张兆云,林璞,王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):179-187.
[35] 郑涛,吕文轩. 基于时序配合的柔直配电网后备保护与控制协同方案[J]. 电力系统自动化,2022,46(2):137-145.
[36] 侯俊杰,宋国兵,徐瑞东,等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(14):176-187.
[37] 张俊,徐箭,许沛东,等. 人工智能大模型在电力系统运行控制中的应用综述及展望[J]. 武汉大学学报(工学版),2023,56(11):1368-1379.
[38] 荆渝,刘友波,邱高,等. 基于区间估计与深度强化学习的有源配电网多智能体电压滚动控制[J]. 电网技术,2023,47(5):2019-2028.
[39] 全欢,彭显刚,刘涵予,等. 基于深度强化学习的配电网实时电压优化控制方法[J]. 电网技术,2023,47(5):2029-2038.
[40] 黄定威,王锋,李波. 面向新型电力系统的含风光储配电网多目标调度方法[J]. 电测与仪表,2025,62(3):38-45.
[41] 郝文斌,孟志高,张勇,等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(14):23-33.
[42] 吴璐子,缪希仁,庄胜斌,等. 含分布式电源配电网故障检测与定位研究综述[J]. 福州大学学报(自然科学版),2022,50(6):751-759.

[43] 刘建华,沈松伟,周明平,等. 一种新型城市轨道交通馈线电流保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(22):84-89.
[44] 许玉柱. 新型电力系统的配电网故障检测与处置要点探究[J]. 电气技术与经济,2024(2):384-386,389.
[45] 王瑞珏,张鹏宇,杨冬冬,等. 新型电力系统下直流配电网线路故障检测分析研究[J]. 中国测试,2025,51(12):158-165.
[46] 薛俊杰. 面向新型电力系统的智能配电网故障预测与自适应控制方法研究[J]. 电子元器件与信息技术,2026(4):5-8.
[47] 张韶华. 面向新型电力系统基于时空特征的配电网故障识别应急算法研究[J/OL]. 电测与仪表, 2026-02-28. https://link.cnki.net/urlid/23.1202.TH.20260228.1109.002.
[48] 武骁,何正友,彭少博,等. 基于行波固有频率的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(11):67-73.
[49] 周泽华,曾祥君,喻锟,等. 基于故障点虚拟映射的配电网行波定位新方法[J]. 电力系统保护与控制,2026,54(8):58-69.
[50] 刘子奕,贾科,姚昆鹏,等. 基于主动注入的柔性直流配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(18):21-30.
[51] 薛士敏,刘存甲,李蒸,等. 基于控保协同的环形直流微网单端测距保护技术[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):122-129.
[52] 朱铮,蒋超,许堉坤,等. 基于智能电能表的新型电力系统低压配电网线阻抗计量[J]. 电子器件,2025,48(1):206-210.
[53] 王伟,李颖华,杨冬冬,等. 广域视角下的新型电力系统配电网故障定位方法研究[J]. 中国工程机械学报, 2026, 24(2):349-354.
[54] 马宝娟,孟萨出拉,段钧宝,等. 面向新型配网保护的无线通信网络优化方案研究[J]. 电力信息与通信技术,2026,24(6):44-52.
[55] Reveles-Miranda M, Flota-Bañuelos M, Chan-Puc F, et al. A hybrid control technique for harmonic elimination, power factor correction, and night operation of a grid-connected PV inverter[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(2): 664-675.
[56] Zhang Yang, Wang Xiao, Mu Yang, et al. Photovoltaic grid-connected inverter CCS-MPC algorithm based on DSOGI-PLL under weak grid[C]//2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). September 23-26, 2022. Shanghai, China. Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 144-149.
[57] 王潇爽,赵仁德. 三电平DC/DC储能变换器的新型协调控制策略[J]. 电力电子技术,2025,59(10):21-29.
[58] 杨新华,郑越,徐铮,等. 光储一体化变流器并网/离网切换控制技术研究[J]. 电力电子技术,2022,56(1):79-82.
[59] 林霖,裴忠晨,蔡国伟,等. 混合式隔离型模块化多电平变换器[J]. 电工技术学报,2021,36(16):3319-3330.
[60] 苏冰,王玉斌,王璠,等. 基于耦合电感的多相交错并联双向DC-DC变换器及其均流控制[J]. 电工技术学报,2020,35(20):4336-4349.
[61] 聂永刚,李俊青,韩爽,等. 基于虚拟惯量的DC换流器并联直流配电网控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(15):19-26.
[62] 蒋谦,黄志豪,程启明,等. 基于MMC的PET中间隔离级DC-DC变换器的新型模型预测控制策略[J]. 电力建设,2022,43(4):49-57.
[63] 孙毅超,丁楠木,王琦. 基于共载波调制的功率复合型模块化多电平固态变压器[J]. 电力工程技术,2020,39(4):2-8.
[64] Zhuang Yizhan, Liu Fei, Huang Yanhui, et al. A multiport DC solid-state transformer for MVDC integration interface of multiple distributed energy sources and DC loads in distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 2283-2296.
[65] Lillo J, Verdugo D, Rojas F, et al. A modular solid state transformer for future hybrid distribution networks[C]//2021 IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics (COMPEL). November 2-5, 2021, Cartagena, Colombia. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 1-8.
[66] 张文杰,吕世轩,高启瑄,等. 基于固态变压器的交直流混合配电系统协调运行控制策略[J]. 电力建设,2023,44(4):103-112.
[67] Bhawal S, Patel H, Hatua K, et al. Solid-state transformer based on naturally cell balanced series resonant converter with cascaded H-bridge cells switched at grid frequency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 8208-8222.
[68] 刘飞,熊晓琪,查鹏程,等. 直流配电网网架结构与分布式光伏多目标协同优化[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):3754-3764.
[69] 李付强,汤茂东,曲小慧,等. 基于一致性理论的多源直流配网功率自适应控制策略[J]. 电力工程技术,2023,42(3):44-52.
[70] 刘瑜超,刘胜,王景芳,等. 基于分布式Raft算法的直流微电网功率协调控制[J]. 电力系统自动化,2022,46(19):70-77.
[71] 王干,汤茂东,曲小慧,等. 一种含高比例分布式电源的直流电网组网的无差分散式协调控制[J]. 电网技术,2023,47(5):2089-2097.
[72] 贾科,李俊涛,陈金锋,等. 多端口分布式光伏接入直流配电系统整体故障穿越协调控制[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):175-182.

**责任编辑**:张伟博　郭红建