第 52 卷 第 2 期：605-618 高电压技术 Vol.52, No.2: 605-618
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251187

乡村分布式智慧能源系统的形态内涵与关键技术

尚　磊[1]，严文博[1]，董旭柱[1]，刘　通[2]，冀浩然[3]
（1. 湖北省交直流智能配电网工程技术研究中心(武汉大学)，武汉 430070；2. 南方电网科学研究院有限公司，广州 510000；3. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072）

摘　要：我国乡村能源系统服务约 5 亿人口，是乡村振兴的重要基础设施，但面临供电可靠性低、新能源消纳困难、电能质量差及季节性负荷波动等挑战。该文提出以清洁能源为基底、数字化与智能化技术为支撑、电能为核心枢纽的乡村分布式智慧能源系统，期望通过柔性自治、多能互补、需求互动、广域互联构建低碳智能能源生态。该系统以“分布式为主、集中式协同”为能源供应逻辑，采用分层分区的分布式协同调控架构，整合风、光、水、生物质等资源实现自治组网，并依托智能感知与人工智能技术实现自主保障与动态平衡。研究从系统形态规划、灵活自组网、分层分区控制及供能品质优化 4 个维度提出关键技术，同时强调需同步推进隔墙售电、共享储能、电价机制等制度创新，为乡村能源绿色转型与“双碳”目标达成提供支撑。
关键词：乡村；分布式；智慧；能源系统；灵活调控

Rural Distributed Smart Energy System with Electric Energy as the Core Hub: Ideas and Framework

SHANG Lei[1], YAN Wenbo[1], DONG Xuzhu[1], LIU Tong[2], JI Haoran[3]
(1. Hubei Province AC/DC Intelligent Distribution Network Engineering Technology Research Center(Wuhan University), Wuhan 430070, China; 2. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510000, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: China’s rural energy system, which serves about 500 million people, is critical infrastructure for rural revitalization;however, it confronts pressing challenges, including low power supply reliability, hurdles in new energy integration, suboptimal power quality, and pronounced seasonal load fluctuations. To address these issues, this paper proposes a rural distributed smart energy system which is grounded in clean energy, supported by digital and intelligent technologies, and centered on electricity as the core hub. The proposed system fosters a low-carbon intelligent energy ecosystem through multi-energy complementarity, demand-side interaction, and flexible interconnection. The system adopts a “distributed-dominated, centralized-coordinated” supply logic and a hierarchical zonal distributed collaborative control architecture. The system integrates wind, solar, hydro, and biomass resources for autonomous networking, and achieves self-sufficiency and dynamic balance through intelligent sensing and artificial intelligence technologies. This paper presents key technologies from four dimensions: system morphology planning, flexible self-networking, hierarchical zonal control, and energy supply quality optimization. This paper also emphasizes the need to advance institutional innovations such as cross-wall electricity sales, shared energy storage, and electricity pricing mechanisms, providing supports for the green transformation of rural energy and the achievement of dual-carbon goals.
Key words: rural; distributed; smart; energy system; flexible regulation and control

0　引言

截至 2024 年末，我国乡村常住人口达 4.65 亿，占总人口的 33%；农林牧渔行业总产值达 15.85 万亿元，全国几乎所有耕地均分布于乡村地区[1]。能源作为乡村发展的基石，其供给体系质量直接关系到“双碳”目标实现进程与乡村振兴战略实施成效——我国乡村能源网络作为全球规模最大的农村能源供给系统，正面临转型升级的关键挑战。《乡村振兴战略规划(2018—2022 年)》提出构建农村现代能源体系，重点发展太阳能、浅层地热、生物质能等清洁能源，因地制宜开发水能与风能资源[2]。

基金资助项目：国家科技重大专项(2024ZD0800600)。
Project supported by National Science and Technology Major Projects (2024ZD0800600).

在国家战略驱动下，农村电网建设取得显著进展[3]，但是随着农业电气化、乡村旅游、农产品加工等多元用能场景的快速拓展，用户对供电可靠性、电能质量的需求持续升级。当前乡村能源系统仍存在结构性矛盾：基础设施呈现“大而不强”特征，供电可靠率与电能质量指标显著落后于城市水平；专项统计体系尚未健全，导致能源供需匹配、政策精准施策缺乏数据支撑，这已成为制约乡村绿色低碳转型的关键瓶颈。

我国乡村能源技术研究起步较早，其技术雏形可追溯至 20 世纪 80 年代以天然气冷热电联供为代表的分布式供能系统[4]。该系统基于“分配得当、各得其所、温度对口、梯级利用”的能源梯级利用原则，实现了能源的高效转化与综合利用，为后续乡村能源技术发展奠定了理论基础。在乡村电能供应领域，我国长期以大电网延伸为主导模式，其供电可靠性、电能质量及电价水平已处于国际领先地位，但偏远地区仍面临供电成本高、保障难度大等现实挑战。为破解上述难题，近年来我国在配电网工程领域实现了多项关键突破：2021 年国内首个±10 kV 三端柔性直流配电网投运，支持 20 MW 光伏接入，降低配网损耗 15%以上[5]。2022 年在韶关乳源智能配电网试点，部署智能终端设备 800 余套，实现故障定位时间从 2 h 缩短至 3 min[6]。文献[7]以韶关翁源为例研究县域农村智能配电网关键技术与实现路径，基于“云管边端”理念提出翁源县域农村智能配电网关键技术，为乡村电网智能化转型提供了具有现实意义的参考范式。

学术界围绕乡村配电网升级也展开了系统性探索。大量文献聚焦配电网柔性互联技术发展方向，提出了多维度解决方案，包括：基于柔性配电装备的配电系统多时空尺度规划方法[8-9]、生物质能与配电网协同应用技术[10]、极端条件下的电网弹性提升技术[11-12]等技术路径[13-15]。近年来，数字孪生、人工智能等前沿技术逐渐向乡村能源领域渗透，为构建新型乡村能源体系提供了技术支撑。文献[16-18]提出以数字孪生为主要支撑框架的智慧微电网的应用体系，文献[19-20]指出人工智能技术是提升微电网运行优化安全性、可靠性和经济性的有效工具，为乡村能源系统的智能化升级提供了新路径。

国际方面，美国农村电力合作协会针对美国乡村特色实施了多个农村微电网试点，在亚利桑那州较偏僻的 Arivaca 地区，与当地合作社 Trico Electric Cooperative 试点光储微电网[21]，通过电力电子设备的柔性配电技术能实现电压、功率灵活调节，提升配电网对风光分布式能源的消纳能力和供电可靠性。然而，该试点聚焦“风光储”单一能源组合，未考虑农业负荷季节性波动和多能互补需求，对中国复杂乡村场景的适配性有限。此外，由于试点采用的模块化电力电子设备制造成本、技术复杂度和运维门槛均偏高，因此在目前中国乡村能源体系下推广难度太大。

总体来说，目前围绕多能耦合系统、电力系统运行控制、新能源并网发电等技术开展了大量的研究工作，但对乡村场景禀赋与特色及技术经济性的适配性的关注不足。因此，本文系统梳理乡村能源系统特色与发展现状，拟围绕乡村场景特色探索分布式智慧能源系统的思路与框架，为乡村能源系统发展奠定基础，支撑国家“乡村振兴”战略。

1 乡村供电系统面临的主要挑战

乡村供电系统作为新型电力体系的重要环节，正面临多维挑战。在可靠性方面，电网基础设施薄弱、线路半径长且抗灾能力不足，供电中断风险较高。在新能源消纳方面，受制于配网容量与灵活调节资源匮乏，弃风弃光严重，但配电系统也面临用户用电成本高的问题。在电能质量方面，挑战突出表现为电压合格率低、三相不平衡等，影响敏感设备运行，同时，保供压力与运营经济性矛盾凸显。

1.1 挑战 1：供电可靠性远低于城市电网

在国家和电力企业共同努力下，我国电网可靠性逐年提升，但农村电网供电可靠性仍显著落后于城市。2018—2023 年全国用户平均停电频次如图 1 所示，2023 年全国供电系统用户平均供电可靠率 99.911%、平均停电时间 7.83 h/户，其中城网、农网用户平均停电时间分别为 2.14 h/户和 8.74 h/户[22]。另外，根据国家电网公司和中国南方电网公司社会责任报告可知[23-24]，2023 年国网和南网供区城网供电可靠率分别为 99.977%和 99.984%，而同期农网的供电可靠率为 99.901%和 99.918 6%。相当于农村用户年均停电时间分别为 8.672 h 和 7.13 h，是城市用户的 4.3 倍和 5.1 倍，如表 1 所示。城乡可靠性差距大的根本原因在于：城乡电网投入失衡。农村电网普遍采用单线-单变的架空线结构，联络、转供不足，自主保障能力缺失，一旦发生短路故障将导致用户大面积停电，直接影响供电可靠性。

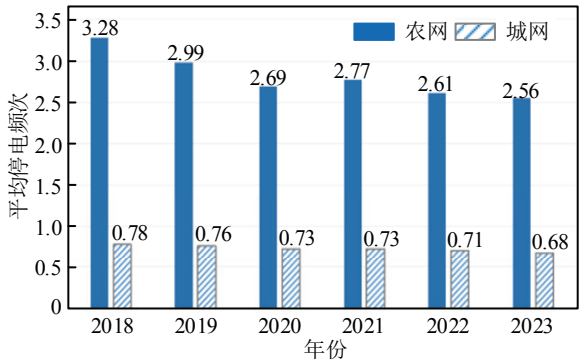


图 1　2018—2023 年全国用户平均停电频次

Fig.1　Average outage frequency of national users from 2018 to 2023

表 1　2023 年城乡供电可靠性数据

Table 1　Reliability data of urban and rural power supply in 2023

电网	数据来源	供电可靠率/%	户均停电时间/h
城市电网	国家电网	99.977	2.015
	南方电网	99.984	1.40
农村电网	国家电网	99.901	8.672
	南方电网	99.918 6	7.13

1.2　挑战 2：反向过载制约分布式清洁能源消纳

分布式新能源发电的功率反送现象显著增加了农村电网的电压越限风险。以山东电网为例，截至 2023 年，分布式光伏总装机容量达 3 640.6 万 kW，累计接入用户 108.8 万户，其中 85%以上分布于线路末端，就近接入 380/220 V 公用配电网，因缺乏可观、可测、可控功能，无法参与电网电压调节。具体表现为：白天光伏出力高峰时段，当发电量超过本地负荷需求时，过剩功率通过低压线路反送电网，导致配电变压器低压侧电压显著抬升，实测最高值达 251 V，超出国家标准规定的 220×(1±7%) V 范围，如图 2 所示，图中有功功率的基准值为 10 kW。究其原因，农村电网原有设计基于单向潮流假设，缺乏动态调压能力。

1.3　挑战 3：电能质量问题突出

乡村电网电能质量问题突出，谐波污染、电压骤降等事件时有发生，制约了乡村特色产业发展[25-27]。以贵州某乳品生产企业为例，乳品生产过程中需要保持生产车间无菌化，一次电压暂降将导致整条生产线停运，且需经过清洗杀菌等复杂环节后才能重启，耗时约 4 h，直接损失超 30 万元。单相接入的户用光伏导致农村配电系统中三相电压不

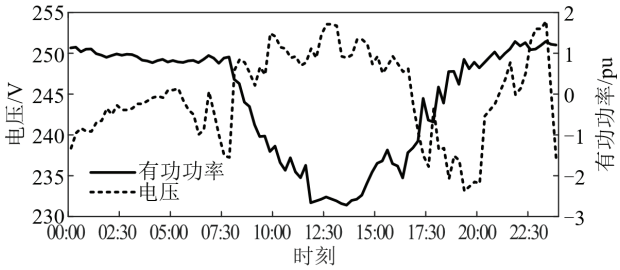


图 2　潮流反送电压越限

Fig.2　Power flow reverse voltage exceeds the limit

平衡问题更加严重。光伏接入后电网总谐波畸变率增加，可能会造成灌溉电机异常发热、增加故障率。贵州毕节连片烤烟房助力烤烟提质增效，但启动瞬间引发电压骤降至 160 V，影响循环风机电机负载运行。

1.4　挑战 4：季节性长周期负荷变化下保供与经济的矛盾突出

春节返乡潮、旅居潮等人工大规模大范围迁徙也带动了乡村负荷的大范围变动；另外，乡村地区农业生产季节性特征显著，例如云贵地区烤烟负荷集中于 7—9 月、炒茶负荷集中于清明前后；而且农产品需即时加工，例如果干加工通常需将收购的新鲜水果当日加工完毕，茶叶生产白天采茶，晚上集中炒茶。候鸟型与季节性农业生产负荷给电网保供与经济运行带来巨大冲击。这导致电力设施配套建设困难，如果容量配置小，则在用电高峰时，难以满足负荷供电需求；如果容量配置大，则可能造成供电设备全年大部分时段处于轻载甚至空载状态，系统运行经济性差；在电力供应保障与经济性方面矛盾突出。

综上所述，乡村电网在可靠性、新能源消纳、电能质量及经济保供运行等方面面临多重挑战。现实困境呈现出系统化特征与深层次矛盾，需构建包含源网荷储协同优化、智能监测预警、定制化治理方案在内的综合优化体系，避免“头痛医头、脚痛医脚”，探索适用于乡村特色的解决思路而非简单沿用城市电网的改造思路可能是破局的关键路径。

2　乡村能源的主要特征与发展机遇

2.1　乡村电力消费快速发展

建国以来，我国农村用电量呈现阶梯式增长态势：建国初期至 2000 年为稳步增长阶段，2000 年后伴随城镇化加速与农村经济发展进入跳跃式增长

期，2022 年用电量突破千亿千瓦时台阶，2023 年已达 7 991.9 亿 kWh，如图 3 所示。这一增长态势与电网建设的持续投入形成良性互动——2023 年全国主要农网改造完成投资 1 743 亿元，同比增长 5.6%，为农村用电需求提供了基础保障。

在能源消费结构转型层面，电网改造推动了农村地区电能替代的深度渗透。以云贵地区为例，电烤烟、电炒茶等农业生产电气化模式快速普及，形成了“电网升级-电能替代-产业转型”的联动效应。值得注意的是，农村用电负荷呈现显著的季节性特征：如图 4 所示，以贵州某电炒茶公变为例，3—4 月炒茶季负荷达到峰值，而 11 月—次年 2 月非生产季负荷近乎为 0，这种周期性波动对电网调峰能力提出了特殊要求。

2.2 分布式能源爆发增长

农村地区能源结构转型成效显著，小水电与分布式光伏发展呈现阶段性特征。小水电实现历史性跨越，装机容量从建国初期的 0.8 万 kW 增至当前的 8 157 万 kW，其中 2000—2010 年为爆发式增长期；但近年来受可开发资源趋紧及环保约束影响，装机规模趋于稳定，如图 5(a)所示。分布式光伏则成为近年增长主力，2024 年装机容量达 3.75 亿 kW，已接近常规水电，较 2019 年增长 495%，年均复合增长率超 40%，具体数据如图 5(b)所示。在农村应用场景中，户用分布式光伏普及成效突出：截至 2023 年底，全国农村地区累计安装户数超 550 万户[28]，带动有效投资逾 5 000 亿元[29]，形成规模效应。

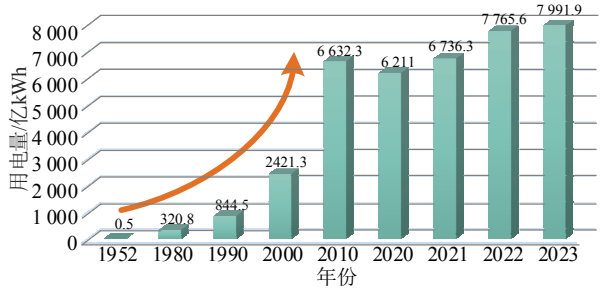


图 3 1952—2023 年我国农村用电量

Fig.3 Rural electricity consumption in China from 1952 to 2023

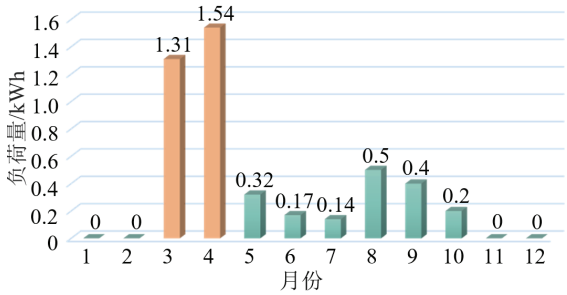


图 4 贵州某电炒茶负荷

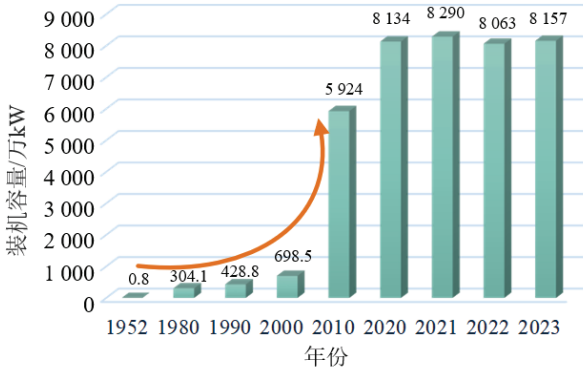
Fig.4 Electric flue-cured tobacco load in Guizhou

2.3 水/风/光/生物质多能协同发展

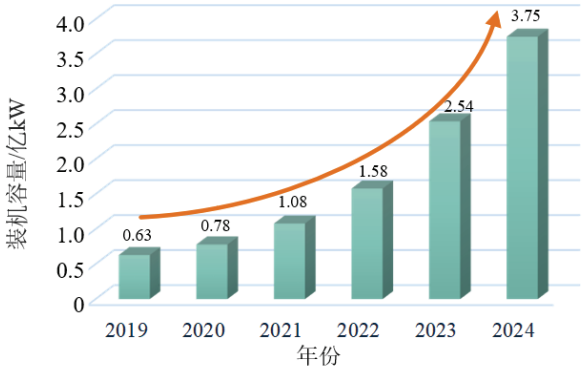
乡村能源系统正从单一资源利用向多能协同模式加速转型，形成水、风、光、生物质 4 维融合的绿色发展格局[30]。生物质能作为乡村传统优势能源，除了农林废弃物外，还有生活垃圾、养殖废物等，应该充分考虑乡村的特点因地制宜利用各类生物质能。目前户用沼气工程累计惠及近 2 亿农民，秸秆打捆直燃与成型燃料技术在北方清洁取暖市场占据重要地位。水能与风光资源的互补开发成效显著，四川、云南等地通过“小水电+分布式光伏”组合，在枯水期实现供电稳定性提升 20%。河北康保县建成风、光、生物质、氢、储五位一体能源集群，可再生能源装机占比超 90%[31]。这种多维协同格局不仅重构了乡村能源供给结构，更创造了显著综合效益。

2.4 乡村特色的分布式智慧能源系统思路

通过乡村能源结构主要特征分析可以发现，我



(a) 小水电装机容量发展趋势



(b) 分布式光伏装机容量发展趋势

图 5 小水电和分布式光伏装机情况

Fig.5 Small hydropower and distributed photovoltaic installed situation

国乡村能源系统仍与城市能源系统存在较大差异，如表 2 所示。乡村能源系统总体呈现 3 大结构性特征，同时也决定其差异化发展路径。

1）能源网络形态：以电力为核心的单枢纽架构

乡村能源体系中，唯有电力形成全域互联的物理网络，具备自动化生产调度、标准化传输、动态分配及计量利用的完整技术条件。相较之下，城市能源系统已形成“电网+气网+热力管网”的多网协同格局，叠加区域能源站实现冷热电联产。这种差异决定乡村需构建以电为核心枢纽的多能互补体系，通过电力转换替代传统能源消费，降低对多管网建设的依赖。

2）能源供应逻辑：分布式为主的就地平衡模式

乡村地区单位面积能源蕴藏量是城市的 3.2 倍，尤其风/光/生物质等分布式资源呈现“高分散、高潜力”特征。实际运行数据显示，分布式能源大发时段远超本地即时负荷，具备“就地消纳+余电外送”的双重价值。而城市受空间约束，分布式能源开发潜力仅能满足 15%~20%的负荷需求，必须依赖集中式能源补给。因此乡村能源系统需最大化分布式资源的就地供应能力，通过“分布式发电+区域组网+源荷调节”实现能源自主保障。

3）能源消费特性：季节性长周期波动规律

农业生产与农民生活用能呈现显著的周期性波动特征，这种以季度为单位的波动周期与以小时为单位的城市电网日峰谷特性存在本质差异。传统城市电网的“削峰填谷”调控手段对乡村长周期波动适配性不足，需开发农业生产节律匹配的调度策略。

发展路径启示基于上述特征，乡村能源系统需走差异化创新之路：既要发挥电能作为能源转换枢纽的核心作用，又要释放分布式资源的多元价值，更要建立适应农业生产规律的调度机制。完全照搬城市“大电网+集中式电源”的发展模式，将导致资源利用率低下和投资浪费。因此，构建“以电为枢纽、分布式为主、多能协同”的特色体系，是契合乡村实际的必然选择。

3　乡村分布式智慧能源系统的概念内涵、核心特征及形态架构

3.1　乡村分布式智慧能源系统的概念内涵

乡村分布式智慧能源系统是以清洁能源为基底、数字化与智能化技术为支撑、电能为核心枢纽的新型乡村能源供应与利用体系，是对传统分布式能源系统的创新衍生与功能拓展。其核心内涵在于通过能源供给侧的多能互补、需求侧的高效互动及电网侧的柔性互联，构建起低碳化、智能化、市场化的乡村能源生态系统。

表 2　乡村电网和城市电网的主要差异

Table 2　Main differences between rural power grid and urban power grid

对比维度	乡村电网	城市电网
能源网络形态	以电力为核心的单枢纽架构	形成“电网+气网+热力管网”多网协同格局
能源供应逻辑	分布式为主、集中式协同	集中式为主、分布式补充
能源消费特性	季节性长周期波动	日峰谷短周期波动

具体而言，乡村分布式智慧能源系统的内涵可从 4 重维度理解：“乡村”属性强调需立足乡村地区独特的资源禀赋与产业负荷特性，制定因地制宜的解决方案；“分布式”代表在广域乡村范围内，风能、太阳能、水能、生物质能等能源资源按需分散布局；“智慧”的核心在于依托智能感知、大数据分析及人工智能等技术，构建自主保障、动态调控、供需平衡的能源管理模式；“能源系统”是指系统形态以电力为枢纽，整合多种分布式能源资源，协同供应冷、热、气等多元能源需求，实现能源生产、传输、存储、消费全链条的优化配置。

3.2　乡村分布式智慧能源系统的核心特征

基于乡村分布式智慧能源系统的核心内涵及可实施的技术路径，其核心特征可概括为以下 7 个维度。传统乡村能源系统与本文提出的乡村分布式智慧能源系统在核心特征上的对比情况见表 3。

1）在能源结构方面，区别于传统乡村以单一电能和生物质分散燃烧为主的能源模式，智慧系统强调能源类型多样化与协同化。通过风、光、水、生物质等分布式清洁能源的高效开发，形成“电为中枢、多能互补”的供给体系。

2）在能源存储模式方面，能源存储是应对源荷不确定性的最有效手段，乡村地区幅员辽阔、资源各异，应探索锂电池、超级电容、飞轮等既有储能形式的应用场景与需求，同时更要因地制宜、发展适合乡村特点的多类型能源存储技术，例如小水电的抽蓄化改造、灌溉蓄水等。

3）在电网形态方面，传统乡村电网以单线-单变辐射网架为主，可靠性与扩展性受限。智慧系统通过多层级柔性互联技术与储能装置，构建“源-

表 3 乡村分布式智慧能源的主要特征

Table 3 Main characteristics of rural distributed smart energy

特征	传统乡村能源系统	乡村分布式智慧能源系统
能源类型	电能、生物质分散燃烧	支撑分布式清洁能源高效接入，电/气/热/冷协同供应
供电保障模式	依赖大电网集中供应与保障	正常运行工况时，由大电网+分布式资源保障；故障运行工况时，分布式能源就地自组网保障
电力负荷类型	农民生活负荷为主	农民生活、农业生产、交通出行等多类型负荷
能源存储模式	锂电池、超级电容、飞轮等	因地制宜，发展抽蓄、储气、储水等多类型乡村储能形式
电网形态结构	以单线-单变的辐射网架为主	通过多层级柔性互联与储能等技术构建灵活网架；标准化、智能化接口技术支撑多类型移动资源即插即用
运维巡检模式	以供电所为单位的人工巡检模式	以智能配用电装备为基础的自检运维模式
调控体系架构	盲调或不调不控	以低成本、芯片化感控终端为基础的可观、可测、可控、可调；以人工智能、大数据为基础的分级分区自治管控模式
运营管理模式	电网企业尽责保障、单一价格、统一收费	隔墙售电、共享机制、电价机制、市场机制等协同吸引社会资本，电网企业牵头，社会多类型企业共同投资

网-荷-储”灵活互动的网架结构。

4）在供电保障方面，从完全依赖大电网的被动模式，转向“大电网+分布式能源就地组网”的协同保障。分布式能源可在极端天气或主网故障时快速组网，实现孤岛运行与电能自平衡。

5）在运维巡检模式方面，乡村分布式智慧能源系统以智能配用电装备为基础，结合无人机、物联网技术，实现设备状态实时监测与故障自诊断，提升运维效率。

6）在调控体系方面，基于低成本、芯片化的感控一体终端，构建“可观、可测、可控、可调”的智能调控网络。通过人工智能算法对海量数据进行分析，实现分级分区自治管控，如负荷预测、动态电价响应等。

7）在市场与运营机制方面，突破传统电网企业单一运营模式，引入隔墙售电、共享储能、绿电交易等市场机制，吸引社会资本参与投资。通过电价激励引导用户参与需求侧响应，形成多方共赢的能源生态。

3.3 乡村分布式智慧能源系统的形态架构

乡村分布式智慧能源系统以“灵活组网+多能耦合”为主要特征，通过分层分布式架构实现能源生产、传输、消费的动态优化。其形态架构如图 6 所示，具体分为区域层、馈线层、台区层三级协同体系。

区域层以集中式风光电站、变电站为核心，通过高压输电网络接入省级主电网，承担基础负荷供电与区域能源调节功能。该层级依托大电网的容量优势，为中低压侧分布式能源消纳提供稳定支撑，同时通过调度指令实现跨区域能源互济。

馈线层以柔性互联与能信融合为主要手段，柔性互联主要通过中压柔性互联装置实现不同馈线间的潮流动态调控，当某一馈线出现功率盈余或缺口时，可快速通过互联系统实现跨馈线功率支援。能信融合是指将管控区域内的能量和信息状态统一采集、统一处理，具体实施为在馈线层部署能信融合终端，实时采集各馈线的运行数据，通过边缘计算实现能源流与信息流的协同优化；同时能信融合终端将监测数据上传至区域能源管理平台，结合气象预测与负荷特性实施中长期动态调整。

台区层作为直接服务用户的“最后一公里”，采用“分布式能源自组网+低压柔性互联”模式。

每个单元整合光伏、储能、微型风机等分布式能源，通过能信融合装备实现单元内源-储-荷的协同控制，同时实时上传电力数据至能信融合终端，形成“单元自治-区域协同”的调控体系。多个自组网单元之间通过低压柔性互联装置实现交直流混合组网，实现单元间潮流互济与相互支撑。

4 乡村分布式智慧能源系统的关键技术

从能源系统构建与运行层面看，乡村分布式智慧能源系统面临技术适配性与制度协同性双重挑战，共性科学问题集中于多能协同规划、动态调控优化、制度协同创新 3 大维度。本文面向乡村分布式智慧能源系统“单元自组网+集群主动同步+广域自平衡”的具体技术要求，从系统形态规划、灵活自组网、分层分区控制和供能品质优化 4 个方面提出构建乡村分布式智慧能源系统的关键技术。

4.1 分布式能源系统形态规划技术

乡村能源系统当前面临多重结构性挑战：发展路径缺乏系统性设计导致转型方向模糊；供能网架以单线-单变辐射网架为主，存在可靠性与扩展性受

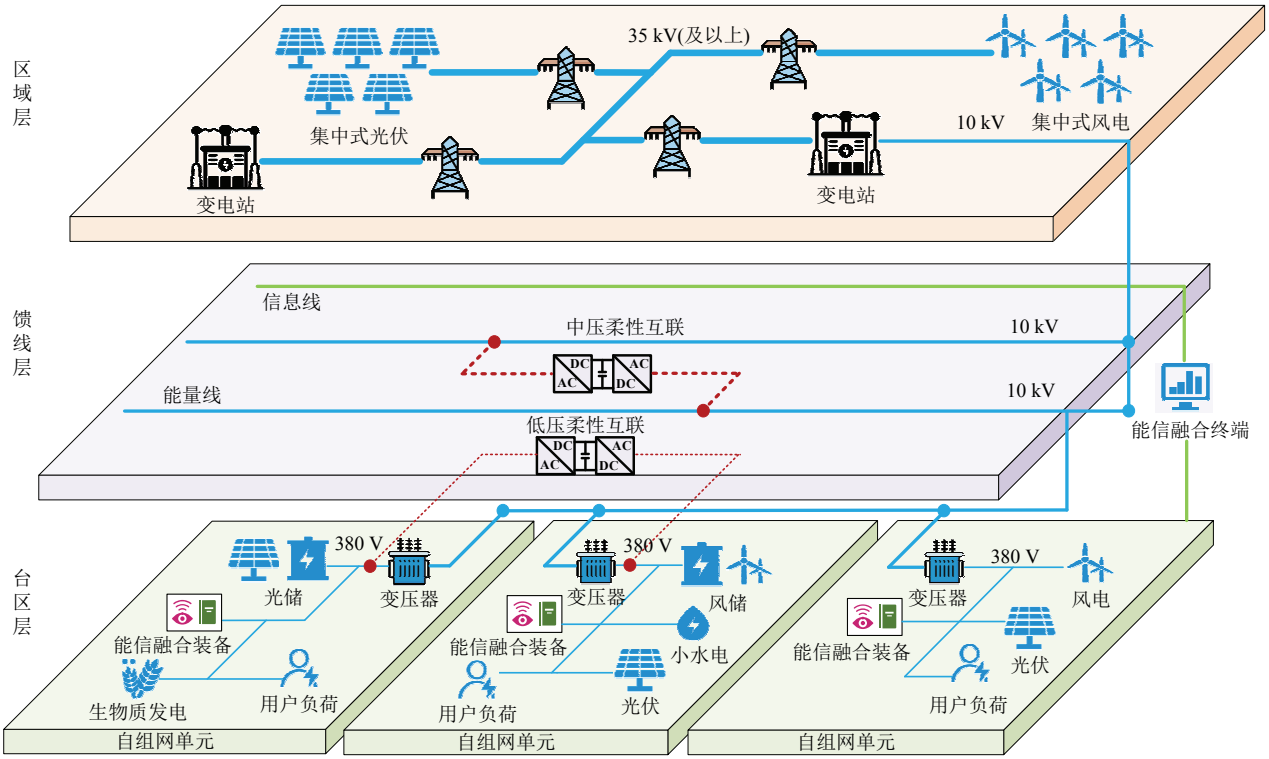


图 6　乡村分布式智慧能源系统形态架构

Fig.6　Morphological architecture of rural distributed smart energy system

限等问题；农业生产与能源消费的多能流耦合特征显著；新型源荷的接入承载力不足。传统规划方法受限于单一能源维度分析，难以适应异质能源与农业生产深层耦合、乡村产业结构多元化及运营主体复杂化带来的多重不确定性，亟需创新分布式能源系统形态规划技术体系[32-33]。

具体技术路线可分为 4 阶段递进实施。

1）发展目标与演化路径动态建模

通过系统动力学方法构建“资源禀赋-产业需求-政策约束”3 维模型，量化不同情景下的能源需求演变趋势，识别关键转折点，形成短期试点-中期推广-长期优化的分段演化路径图谱。

2）典型供能场景设计与承载力评估

针对农业园区、生态旅游区、偏远村落等差异化场景，设计“光伏+储能+微电网”等 12 类典型供能模式，开发考虑“源荷时空匹配度”“电网接纳裕度”“经济性指标”的承载力评估矩阵，例如在高海拔地区重点评估风电穿透率与电压稳定性的关系，确保规划方案的场景适配性。

3）多能柔性协同与源荷协调演进规划

构建“风光水储生”多能互补的协同优化模型[34]，采用混合整数规划算法实现冷热电联产系统的容量配置，同时设计源荷互动机制，通过数字孪生平台模拟不同气候年型下的源荷演化过程，提升系统抗波动能力[35]。

4）规划方案评价体系构建

建立包含技术可行性、经济可持续性、环境友好性、社会接受度的 4 维评价指标体系，其中应重点考虑经济可持续性，这是乡村分布式智慧能源系统能否大力推广的关键因素。引入模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process，FAHP)对多方案进行排序[36-37]，最终形成可动态调整的物理网架结构方案，支撑乡村分布式智慧能源系统的全生命周期优化。

4.2　分布式能源灵活自组网技术

分布式能源系统的形态规划技术在一定程度上有助于提升乡村电网的供电可靠性，但仍存在显著局限：当上级电网发生故障时，台区级供电的连续性难以保障；在远离主网的偏远地区，供电质量受限于网架结构，可靠性更难保证[38]。这种时空维度的约束条件，对乡村电网的分布式能源灵活组网能力提出了迫切需求。

分布式能源灵活自组网是指利用分布式可再生能源与负荷就地组网运行，既包含与大电网并联运行，也包括独立自主运行。当前针对分布式能源

组网技术的研究多聚焦于微电网场景，其并/离网切换普遍依赖控制结构转换[39]，典型模式为并网 PQ 控制切换至离网 VF 控制[40-42]。然而，控制结构切换过程中易引发显著的电压电流冲击，这种暂态响应可能导致微电网保护装置误动作，进而威胁系统安全稳定运行[43]。此外，采用传统控制切换方法在离网后，区内发电单元难以实现同步稳定并联运行；而在再次并网时，发电单元输出电压与接入系统母线电压间的相位超前滞后关系难以精准评估，可能造成逆变器功率倒灌现象，最终损害分布式发电装置[44]。

针对传统定制化微电网在 PQ/VF 控制模式切换时产生的冲击及主从并列难题，亟需一种无需控制结构转换的灵活自组网技术，以实现并离网平滑切换不停电、同期并网快速恢复及多发电单元稳定并列运行。文献[45]提出的矢量刚度补偿技术可以改善并网点处的交流电压动态特性。矢量刚度补偿是利用装置本身输出内电势矢量的刚度特性，自然地提供无功补偿，减少电压动态变化过程。该技术可以通过对并网点电压矢量的幅频二维支撑显著提升区域系统自组网能力。结合乡村电网实际，从改造难度、控制复杂度及通信成本等维度考量，在台区侧加装矢量刚度补偿装置并配合协同控制策略是可行路径，如图 7 所示。该方案通过矢量刚度补偿装置提供稳定的频率电压参考，引导台区内分布式电源自主同步组网，同时基于各电源实时功率裕度动态调节出力，实现源荷协同优化。为证明所提“矢量刚度补偿+协同控制”的自组网方案在乡村能源系统的可行性，建立常规乡村配电网的仿真模型验证，相关研究结果见附录 A。

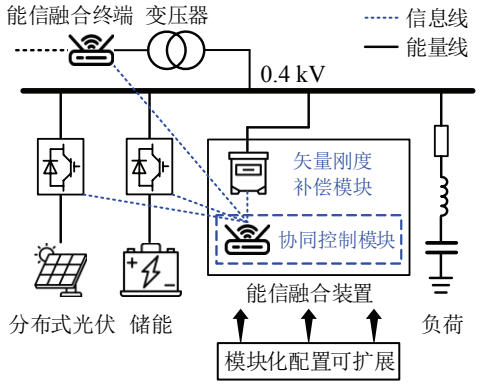


图 7 “矢量刚度补偿+协同控制”的自组网方案

Fig.7 “Vector stiffness compensation + cooperative control” ad-hoc network scheme

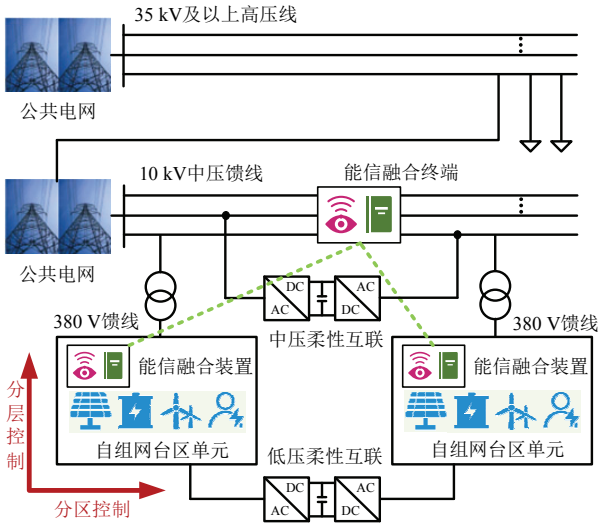


图 8 分布式能源分层分区自治调控体系

Fig.8 Distributed energy hierarchical partition autonomous regulation system

4.3 分布式能源分层分区灵活调控技术

乡村分布式能源系统需推动现有调度自动化系统向基层延伸，在延伸过程中需充分考虑集中调度系统的承载压力，因此构建分层分区的分布式协同调控架构成为关键[46-48]。该控制架构的核心在于实现层内自治、区间互济与层间协同的三级控制机制。

层内协同控制采用通信指令与动态控制相结合的多层级自治模式，具体分为区域层、馈线层和台区层三级协同：区域层聚焦变电站尺度的协同调控，包括站内各馈线工作指令的统筹分配及变电站间的分布式协同；馈线层侧重线路级协同，实现馈线内各台区的指令协同及跨馈线的分布控制；台区层通过部署能信融合装备，如图 8 所示，将调度指令与本地动态控制逻辑结合，支撑分布式能源就地消纳与稳定运行，核心功能包括基于矢量刚度补偿的故障自组网、分布式电源并网控制及电压/频率稳定调节等[49]。区间协同通过加装低压柔性互联装置，依托统一调度指令实现跨区域能源互济，提升负荷高峰时段的供电可靠性[50]。层间协同则借助能信融合装备与终端的数据双向传输机制，实现不同层级间的实时状态感知与控制指令交互。通信方式可根据乡村电网实际条件灵活选择，包括光纤、4G/5G 无线通信或电力线载波等多种技术路径[51]，尽可能减小通信延迟对分层分区控制的影响。针对乡村较为偏远的地区，未来甚至可以利用卫星通信实现全域覆盖。

4.4　乡村供能品质自适应优化技术

乡村电网谐波问题主要源于非线性用电设备普及、配网结构薄弱及运行管理不足，对供电质量与设备安全构成显著威胁，需通过多维度措施实施综合治理。在分布式新能源渗透率持续提升及非线性负载规模化接入的乡村电网环境中，传统有源滤波装置(active power filter，APF)仍面临 3 大核心挑战：一是谐波频率动态变化难题，二是谐波成分复杂化，三是弱电网环境下的控制稳定性问题[52-55]。乡村电网中 APF 的性能瓶颈主要集中于谐波检测环节的动态响应能力，以及在乡村复杂场景下的运行稳定性与控制鲁棒性。因此，亟需研发一种无需依赖谐波检测的自适应谐波抑制技术，同时满足乡村弱电网环境下的稳定性要求。

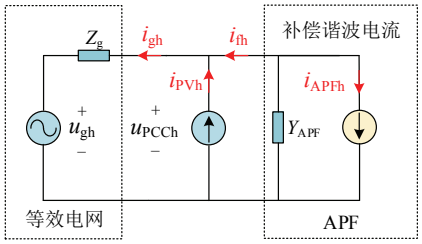
基于这一思路，自适应谐波抑制技术可采用功率自同步控制策略，突破传统 APF 的技术框架，以电压源形式直接补偿谐波电压，而非传统方案的谐波电流补偿。传统 APF 通过注入反向谐波电流来抵消非线性负载与分布式发电装置产生的谐波电流，而自适应滤波技术则利用功率自同步功能，通过双重作用机制实现谐波治理：一方面输出谐波电压最大限度抵消电网背景谐波电压，另一方面通过优化控制策略输出补偿电流，针对性抵消非线性负荷与分布式能源引入的谐波电流，如图 9 所示，其中 u_{gh}、i_{gh}、Z_g 分别表示等效电网谐波电压、谐波电流和阻抗；i_{PVh}、i_{APFh}、i_{INFh} 分别表示光伏输出谐波电流、APF 输出补偿电流和自适应滤波器输出补偿电流；u_{PCCh}、u_{INFh} 分别表示等效并网点谐波电压和自适应滤波器等效谐波补偿电压；Y_{APF}、Z_{INF} 分别表示 APF 等效输出导纳和自适应滤波器等效输出阻抗。这种方案不仅彻底省去了谐波检测环节，更借助构网技术特有的功率自同步控制，显著提升了弱电网环境下的稳定运行能力。

除关键技术应用创新外，乡村分布式智慧能源系统的建设还需同步推进制度创新，重点涵盖隔墙售电[56]、共享储能[57]、电价机制[58]、电碳市场[59]及财税支持等核心领域。

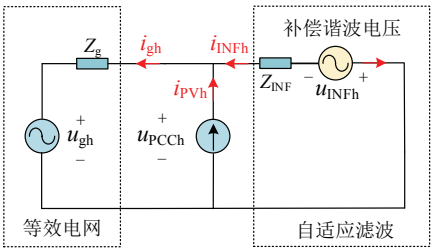
5　总结与展望

乡村分布式智慧能源系统通过差异化技术路径与架构设计，有效应对了乡村电网的结构性矛盾：

1）以电力为核心枢纽，采用“分布式为主、就地平衡”的供应模式，适配乡村高分散、高潜力



(a) APF谐波抑制原理



(b) 自适应谐波抑制原理

图 9　传统 APF 和自适应滤波技术的补偿原理

Fig.9　Compensation principle of traditional APF and adaptive filtering technology

的能源资源禀赋及季节性负荷波动特征，区别于城市多网协同与集中式补给的能源形态。

2）提出分布式能源系统形态规划技术，实现“资源-产业-政策”动态匹配；创新灵活自组网技术，解决并离网切换冲击与偏远地区供电连续性问题；构建分层分区协同调控架构，通过电压矢量突变量感知等技术提升功率互济效率与动态调节能力；研发供能品质自适应优化技术，应对谐波污染挑战。

3）同步推进隔墙售电、共享储能、电价机制、电碳市场及财税支持等配套政策，吸引社会资本参与，形成多方共赢的能源生态。

乡村分布式智慧能源系统有望重塑乡村能源治理体系，推动能源民主化转型。未来发展还需重点关注 4 个方面。

1）分布式能源基础理论

乡村分布式智慧能源系统的核心矛盾在于高比例分布式能源接入下的系统可控性与多尺度源荷波动下的动态平衡性，其基础理论研究需突破传统集中式能源系统的理论框架，构建适配“分布式为主、多能协同、时空动态特征”的新型理论体系。在此理论框架下，还存在诸多基础理论问题亟需解决。例如，当前乡村能源系统建模多聚焦单一电能流优化，对“电-热-气-生物质”多能流的耦合机制刻画不足，尤其缺乏农业生产特有的“能源-负荷-

气候”深层交互模型。此外，当前乡村地区大量电力电子设备接入使得其电力系统交流电压动态演化机制发生深刻变革，亟需包含机-电-磁-控多时间尺度动态的交流电压幅频稳定分析新理论。

2）关键技术应用突破

构建乡村分布式智慧能源系统除了多能协同规划技术和动态调控优化技术以外，还应该重点突破乡村用电用能数智化与冷热电气生物质综合利用能效提升技术，多途径实现乡村供用能提质增效。针对极端环境下乡村能源系统故障耦合性强、故障传播复杂而导致系统抗灾能力差的难题，重点攻克多能流联动支撑的协同保护技术，构建故障紧急支撑与自主保供体系，实现多能协同故障自愈和元件修复联合优化。依靠这些关键技术突破，研发系列关键装备并设计成套的应用方案，最终实现乡村能源系统技术集成化和应用模块化装备部署。

3）政策保障与制度创新

政策保障直接影响乡村能源项目的落地，政府应当对乡村能源设施给予一定的投资补贴，并将分布式能源项目纳入地方政府专项债券支持范围。允许地方试点突破现有电力市场规则，大胆探索适合中国乡村能源系统的多层次政策支撑体系。制度创新是乡村能源系统转型的关键支撑，目前诸如隔墙售电、共享储能、电碳协同等前沿制度仍存在核心问题亟需解决。例如，隔墙售电需建立跨主体交易的标准化接口与计量体系，明确分布式电源、电网企业、用户间的权责划分；共享储能需设计“容量租赁+调峰收益”的混合商业模式，通过区块链技术实现储能资源的去中心化调度与收益自动分配；电碳协同需打通乡村分布式能源的碳减排核算通道，将户用光伏、生物质发电等纳入区域碳交易市场。

4）应用场景与产业生态拓展

乡村分布式智慧能源系统的价值创造需深度融合农业生产与乡村治理场景。根据不同乡村地区的地理位置，以资源禀赋为基底、场景融合为路径、利益协同为纽带，深度嵌入农业生产全链条与乡村治理体系，通过“能源+”模式构建多维度价值闭环。具体可从以下 3 个路径深化实践：一是“能源+农业生产协同”，推广“农光互补+智慧灌溉”模式，在光伏板下种植耐阴作物，同时利用光伏电站电力驱动滴灌系统，实现能源与粮食生产的协同增收；二是“能源+文旅消费融合”，结合乡村旅游开发“零碳民宿”集群，通过分布式风电、储能系统与地源热泵的协同，打造“绿电消费+碳足迹可视化”的沉浸式体验；三是“能源+乡村经济振兴”，将分布式能源收益纳入村集体基金，通过“能源合作社”模式实现收益共享。

未来，乡村分布式智慧能源系统的高级形态是从“单一供电功能”升级为“乡村振兴综合服务平台”，实现“能源-产业-生态”协同发展，为乡村绿色转型与共同富裕提供可持续支撑，最终形成具有中国特色的乡村能源可持续发展范式，为全球农村能源转型提供借鉴。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2024[M]. 北京：中国统计出版社，2024.
Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook 2024[M]. Beijing, China: China Statistical Press, 2024.

[2] 中共中央国务院. 乡村振兴战略规划(2018—2022 年)[R]. 北京：中共中央国务院，2018.
CPC Central Committee and State Council. Rural revitalization strategic plan (2018—2022)[R]. Beijing, China: CPC Central Committee and State Council, 2018.

[3] 朱继忠，董瀚江，李盛林，等. 基于分布式新能源集群的微能源网优化调度综述[J]. 中国电机工程学报，2024，44(20)：7952-7969.
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of optimal dispatching for the aggregation of micro-energy grids based on distributed new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 7952-7969.

[4] 洪 慧. 燃料化学能与物理能综合梯级利用的热力循环[D]. 北京：中国科学院研究生院(工程热物理研究所)，2004.
HONG Hui. Novel thermodynamic cycle with cascade utilization of chemical exergy and physical exergy of fossil fuel[D]. Beijing, China: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2004.

[5] 佚 名. 南方电网国内首个±10 kV 三端柔性直流配电网在佛山投运[N]. 中国电力报，2021-12-01(3).
Anonym. The first ±10 kV three-terminal flexible DC distribution network of China Southern Power Grid has been put into operation in Foshan[N]. China Electric Power News, 2021-12-01(3).

[6] 广东电网公司. 广东电网 2022 年社会责任报告[R]. 广州：广东电网，2022.
Guangdong Power Grid Corporation. Guangdong power grid 2022 social responsibility report[R]. Guangzhou, China: Guangdong Power Grid, 2022.

[7] 罗艺华，刘志勇，刘玉就，等. 县域农村智能配电网关键技术与实现路径[J]. 农村电气化，2020(7)：5-7.
LUO Yihua, LIU Zhiyong, LIU Yujiu, et al. Research of key technology and realization path related to rural intelligent power distribution network in county region[J]. Rural Electrification, 2020(7): 5-7.

[8] 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 alloca-

tion of SOP in multi-voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6831-6843.

[9] 王成山，王　瑞，于　浩，等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报，2020，40(8)：2385-2395.
WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2395.

[10] 马隆龙，唐志华，汪丛伟，等. 生物质能研究现状及未来发展策略[J]. 中国科学院院刊，2019，34(4)：434-442.
MA Longlong, TANG Zhihua, WANG Congwei, et al. Research status and future development strategy of biomass energy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 434-442.

[11] 别朝红，李更丰. 极端天气条件下新型电力系统风险评估与弹性提升[J]. 全球能源互联网，2024，7(1)：1-2.
BIE Zhaohong, LI Gengfeng. Risk assessment and resilience improvement of new power systems in extreme weather[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 1-2.

[12] 张沈习，王丹阳，程浩忠，等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化，2022，46(8)：189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.

[13] 董旭柱，华祝虎，尚　磊，等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[14] 王成山，宋关羽，李　鹏，等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(7)：1889-1896.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1896.

[15] HUA Z H, SHANG L, DONG X Z, et al. A hybrid networking scheme with grid-forming and grid-following converters for resilient active distribution system[C]//Proceedings of CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2024.

[16] 王榕泰，吴细秀，冷宇宽，等. 数字孪生技术在新型电力系统中的发展综述[J]. 电网技术，2024，48(9)：3872-3889.
WANG Rongtai, WU Xixiu, LENG Yukuan, et al. Review of the development of digital twin technology in new type power systems[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3872-3889.

[17] 孙永辉，孟雲帆，葛磊蛟，等. 人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2239-2252.
SUN Yonghui, MENG Yunfan, GE Leijiao, et al. Application and prospect of microgrid operation optimization enabled by artificial intelligence[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2239-2252.

[18] 高　扬，贺　兴，艾　芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术，2021，45(7)：2483-2491.
GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2483-2491.

[19] 葛磊蛟，范延赫，来金钢，等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2219-2238.
GE Leijiao, FAN Yanhe, LAI Jingang, et al. Artificial intelligence enabled microgrid optimization technology for low carbon economy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2219-2238.

[20] 张紫桐. 基于深度强化学习的新型电力系统多层级优化调度研究[D]. 武汉：华中科技大学，2023.
ZHANG Zitong. Deep reinforcement learning based multi-level optimal scheduling of new power system[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2023.

[21] NRECA. FEMA public assistance: powering recovery for rural America[EB/OL].[2024-07-20]. https: //www. electric. coop.

[22] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2024[R]. 北京：中国电力出版社，2024.
China Electricity Council. Annual development report of China's electric power industry 2024[R]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2024.

[23] 国家电网公司. 2023 社会责任报告[R]. 北京：中国电力出版社，2024.
State Grid Corporation of China. 2023 Social responsibility report[R]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2024.

[24] 中国南方电网公司. 2023 社会责任报告[R]. 广州：中国南方电网公司，2024.
China Southern Power Grid Company. 2023 Social responsibility report[R]. Guangzhou, China: China Southern Power Grid Company, 2024.

[25] 吴创之，阴秀丽，刘华财，等. 生物质能分布式利用发展趋势分析[J]. 中国科学院院刊，2016，31(2)：191-198.
WU Chuangzhi, YIN Xiuli, LIU Huacai, et al. Perspective on development of distributed bioenergy utilization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 191-198.

[26] 涂春鸣，侯玉超，郭　祺，等. 面向新能源灵活接入的多功能动态电压恢复器及其优化控制研究[J]. 电网技术，2021，45(9)：3487-3495.
TU Chunming, HOU Yuchao, GUO Qi, et al. Multi-function dynamic voltage restorer and its optimal control for flexibly access of new energy sources[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3487-3495.

[27] 郭　祺，贾文慧，涂春鸣，等. 面向暂态电压主动支撑的多功能并网变流器多模式柔性切换策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(21)：156-164.
GUO Qi, JIA Wenhui, TU Chunming, et al. Multi-mode flexible switching strategy of multi-functional grid-connected converters for active support to transient voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 156-164.

[28] 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.

[29] 国家能源局. 能见度丨分布式能源迎来发展良机[EB/OL]. 北京：国家能源局，2024[2025-10-20]. https://www.nea.gov.cn/2024-03/15/c_1310767760. htm.
National Energy Administration. Visibility | distributed energy ushered in a good opportunity for development[EB/OL]. Beijing, China: National Energy Administration, 2024[2025-10-20]. https://www.nea.gov.cn/ 2024-03/15/c_1310767760. htm.

[30] 农业农村部科技教育司. 中国农村能源年鉴(2014—2021)[M]. 北京：中国农业出版社，2022.

Department of Science, Technology and Education, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China rural energy yearbook (2014—2021)[M]. Beijing, China: China Agriculture Press, 2022.

[31] 李承周，王宁玲，窦潇潇，等. 多能源互补分布式能源系统集成研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(18)：7127-7149.
LI Chengzhou, WANG Ningling, DOU Xiaoxiao, et al. Review and prospect on the system integration of distributed energy system with the complementation of multiple energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7127-7149.

[32] 程其云，李 峰，罗澍忻，等. 新型电力系统规划方法框架及关键支撑技术[J]. 电网技术，2025，49(6)：2219-2231.
CHENG Qiyun, LI Feng, LUO Shuxin, et al. Research on the planning methodology framework and key supporting technologies for new power systems[J]. Power System Technology, 2025, 49(6): 2219-2231.

[33] YU S J, CHEN C M, WANG Y C, et al. Station-network cooperative optimization planning of urban integrated energy system considering heat storage capacity of heat network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(3): 1956-1976.

[34] LIAO J L, LIN J, WU G L, et al. Collaborative optimization planning method for distribution network considering “hydropower, photovoltaic, storage, and charging”[J]. IEEE Access, 2024, 12: 172115-172124.

[35] ZHU J P, ZHOU Y, DONG X F, et al. Mixed-integer linear programming based distribution network reconfiguration model considering reliability enhancement[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(3): 1336-1346.

[36] 穆永铮，鲁宗相，乔 颖，等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系[J]. 电网技术，2015，39(1)：23-28.
MU Yongzheng, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A comprehensive evaluation index system of power grid security and benefit based on multi-operator fuzzy hierarchy evaluation method[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 23-28.

[37] 刘慧玉，王渝红，石 访，等. 电网稳定智能判别模型可信度指标体系构建与综合评价方法[J]. 电力系统自动化，2025，49(4)：188-202.
LIU Huiyu, WANG Yuhong, SHI Fang, et al. Construction and comprehensive evaluation method for trustworthiness indicator system of intelligent assessment model for power grid stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 188-202.

[38] 王梓旭，林 伟，杨知方，等. 考虑负荷弹性空间的配电网可靠性扩展规划方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(18)：6655-6667.
WANG Zixu, LIN Wei, YANG Zhifang, et al. A reliability-constrained distribution network expansion planning method considering flexibility space of power demand[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6655-6667.

[39] ZHANG H Y, HE S, YUAN Z, et al. A seamless switching strategy for hybrid AC/DC microgrids under varied control complexities[J]. IEEE Access, 2025, 13: 122420-122431.

[40] 颜湘武，贾焦心，王德胜，等. 虚拟同步发电机的并网功率控制及模式平滑切换[J]. 电力系统自动化，2018，42(9)：91-99.
YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, WANG Desheng, et al. Power control and smooth mode switchover for grid-connected virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 91-99.

[41] 程启明，褚思远，程尹曼，等. 基于改进型下垂控制的微电网多主从混合协调控制[J]. 电力系统自动化，2016，40(20)：69-75.
CHENG Qiming, CHU Siyuan, CHENG Yinman, et al. Multiple Master-slave mixed coordinated control for microgrid based on improved droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 69-75.

[42] 张腾飞，黎旭昕. 含光伏源的微电网孤岛/联网平滑切换控制策略[J]. 电网技术，2015，39(4)：904-910.
ZHANG Tengfei, LI Xuxin. A control strategy for smooth switching between island operation mode and grid-connection operation mode of microgrid containing photovoltaic generations[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 904-910.

[43] LIANG H F, SUN H. Research on smooth transfer control strategy for master-slave microgrid[C]//Proceedings of 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Macao, China: IEEE, 2019: 1-5.

[44] 孙凌玉. 基于下垂控制的交流微电网组网技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2022.
SUN Lingyu. Research on AC microgrid networking technology based on droop control[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2022.

[45] SHANG L, DONG X Z, LIU C X, et al. Modelling and analysis of electromagnetic time scale voltage variation affected by power electronic interfaced voltage regulatory devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1102-1112.

[46] DI FAZIO A R, RISI C, RUSSO M, et al. Coordinated optimization for zone-based voltage control in distribution grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 173-184.

[47] XU X T, XUE F, WANG X L, et al. Upgrading conventional distribution networks by actively planning distributed generation based on virtual microgrids[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 2607-2618.

[48] 郭子轩，林利祥，马乙歌. 考虑高比例新能源接入的配电网网架多目标规划方法[J]. 电工技术，2024(18)：67-69.
GUO Zixuan, LIN Lixiang, MA Yige. Multi-objective planning of distribution framework considering high-proportion integration of new energy generations[J]. Electric Engineering, 2024(18): 67-69.

[49] SHANG L, HUA Z H, LIU C X, et al. Amplitude-phase-locked-loop-based power injection strategy for wind power generation under three-phase grid fault[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2952-2961.

[50] LIU F Z, LUO M, CUI Z Y, et al. Master-slave control strategy of flexibly interconnected microgrid clusters under gridconnected and islanded modes[C]//Proceedings of 2025 10th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Beijing, China: IEEE, 2025: 2195-2200.

[51] 郑伟锋. 工业自动化系统中各种通信方式及其应用分析[J]. 电工技术，2023(22)：8-11.
ZHENG Weifeng. Analysis on various communication methods in industrial automation systems and their applications[J]. Electric Engineering, 2023(22): 8-11.

[52] LI Y G, YI H, ZHUO F, et al. Harmonic oscillation and stabilization strategy of source-current-detected shunt APF considering interaction with nonlinear load and grid impedance[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(1): 420-430.

[53] FEI J T, CHEN Y. Dynamic terminal sliding-mode control for single-phase active power filter using new feedback recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9904-9922.

[54] CHEN H, LIU H W, XING Y, et al. Enhanced DFT-based controller for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8017-8030.

[55] HOU S X, QIU Z Y, CHU Y D, et al. Hybrid intelligent control using hippocampus-based fuzzy neural networks for active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 15924-15942.

[56] 康文明，王春武. 破解新能源发展难题的一点思索——从隔墙售电和绿电孤网谈起[J]. 山东国资，2025(5)：100-102.
KANG Wenming, WANG Chunwu. Thoughts on solving new energy

development challenges: starting from electricity sales by partition wall and green power isolated grids[J]. State-Owned Assets of Shandong, 2025(5): 100-102.

[57] 林顺富，郭宇霆，周　波，等. 计及电价不确定性的多虚拟电厂与共享储能协同优化调度方法[J]. 智慧电力，2025，53(7)：20-27.
LIN Shunfu, GUO Yuting, ZHOU Bo, et al. Collaborative optimal scheduling method for multi-virtual power plants and shared energy storage considering electricity prices uncertainty[J]. Smart Power, 2025, 53(7): 20-27.

[58] 冯艺萱，边晓燕，陈　雯，等. 新型电力系统灵活性资源成本回收机制分析及挑战[J]. 电工技术学报，2025，40(21)：7013-7028.
FENG Yixuan, BIAN Xiaoyan, CHEN Wen, et al. Analysis and challenges of new power system flexibility resource cost recovery mechanisms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(21): 7013-7028.

[59] 马　超，秦晓辉，刘晓瑞，等. 新型电力系统电碳协同研究综述：量化方法、关键技术与应用展望[J/OL]. 高电压技术，2025：1-20 [2025-08-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20250639.
MA Chao, QIN Xiaohui, LIU Xiaorui, et al. Review of research on electricity carbon collaboration in new type power systems: quantitative methods, customs construction technologies and application prospects[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-20[2025-08-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20250639.



SHANG Lei
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

尚　磊(通信作者)
1986—，男，博士，副教授，博导
主要从事新型配电系统运行与控制、新能源/储能电力电子变流器并网控制方面的研究
E-mail: shanglei@whu.edu.cn



YAN Wenbo
Ph.D. candidate

严文博
1999—，男，博士生
主要从事新能源发电控制及稳定性分析、新型配电系统运行与控制方面研究
E-mail: 574825652@qq.com

收稿日期　2025-08-05　在线出版日期　2025-11-03　　编辑　程子丰

附录 A

为证明 4.2 节中提出分布式能源的自组网技术的可行性和有效性，对此进行仿真结果验证，利用 Simulink 仿真模拟了常规乡村配电网的实际情况，具体仿真设置和结果如下：如图 A1 所示，仿真系统包括 110 kV/380 V 变电站、10 kV 馈线、分支馈线(含长距离配电线路)及低压配电台区。在 t=2.0 s 时，断开 10 kV/380 V 变压器的连接开关，模拟极端事件导致 380 V 台区与分支馈线突然解列，此时采用所提自组网方法的 380 V 台区进入独立运行模式。在 t=3.0 s 时，独立运行的 380 V 台区发生阶跃功率扰动(有功扰动 P_{dis}=0.3 p.u.，无功扰动 Q_{dis}=0.1 p.u.)。通过仿真频率、电压动态特性及分布式电源输出功率，验证了所提方法独立构建和控制频率电压、平衡负荷与电源的能力。此外，仿真中设置了 4 种负荷 P_L 与分布式电源 P_G 的不同不平衡场景，以验证所提方法在实际运行中不同工况下的有效性。

如图 A2(a)、(b)所示，380 V 台区与分支馈线解列瞬间，矢量刚度补偿装置提供瞬时功率响应。在负荷与分布式电源多种不平衡场景下，矢量刚度补偿装置可自适应提供合理的功率支撑。例如，当与分支馈线解列时，负荷 P_L 与分布式电源 P_G 之间存在 0.3 p.u.的功率缺额，此时矢量刚度补偿装置输出瞬时有功功率，构建并维持独立系统的频率(如图 A2(a)、(b)中蓝线所示)。相反，若 380 V 台区突然解列瞬间存在 0.3 标幺值的功率盈余，矢量刚度补偿装置则吸收瞬时有功功率，避免频率骤升(如图 A2(a)、(b)中紫线所示)。在电压动态控制方面，解列瞬间矢量刚度补偿装置提供瞬时无功支撑，将电压调节在 0.96~1.03 p.u.范围内(符合 IEEE 标准 1547.7 的规定)，如图 A2(c)、(d)所示，从而避免分布式电源脱网，维持独立运行系统对负荷的持续供电。

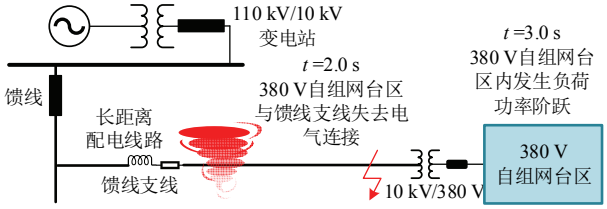


图 A1　常规乡村配电网仿真模拟结构图

Fig.A1　Conventional rural distribution network simulation structure diagram

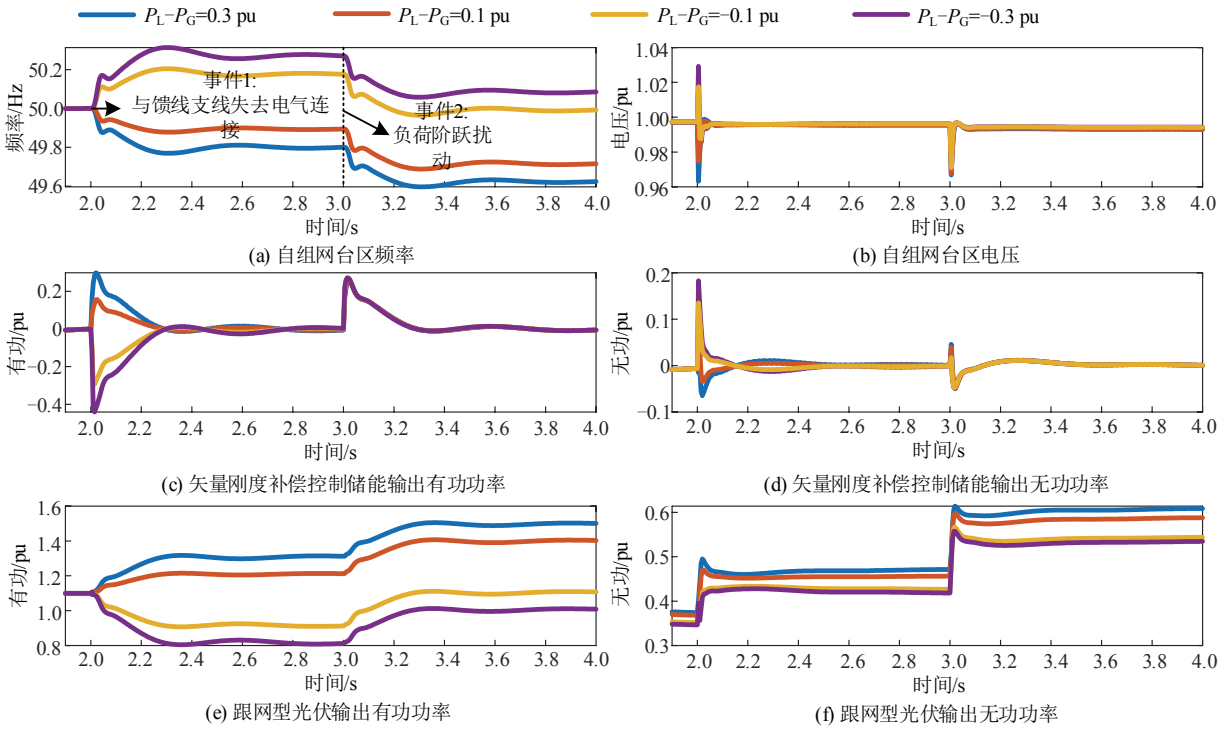


图 A2　“矢量刚度补偿+协同控制”自组网方案仿真结果

Fig.A2　“Vector stiffness compensation + cooperative control” self-organizing network scheme simulation results