

面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术

韦柯余 王心怡 滕焱 马妍 马丽军 施红如^(通讯作者)

南通理工学院, 江苏省南通市, 226002;

摘要: 在全球积极推动低碳经济转型和能源结构优化的战略背景下, 电力系统正经历着从传统集中式模式向分布式、清洁化方向的深刻变革。微电网作为整合分布式可再生能源的关键载体, 其在实现高效消纳绿电与保障区域供电可靠性方面扮演着日益重要的角色。通过设计一种基于注意力机制的长短期记忆网络, 显著提升了风电与光伏出力的预测精度, 为优化调度提供了可靠的数据基础。在此基础上, 构建了一个以运行成本最小化和碳排放量最低为目标的深度强化学习智能体, 使其通过与高保真微电网仿真环境的大量交互, 自主学习并获得兼顾经济性与低碳性的最优运行策略。为了处理系统中的离散与连续变量共存问题, 研究将强化学习的决策输出与混合整数线性规划进行有效结合, 确保解决方案的可行性与最优性。本文的核心研究内容在于上述智能模型的架构设计、训练算法改进及其在复杂场景下的决策有效性验证。仿真结果表明, 该人工智能赋能的方法能够动态自适应地调整微电网内部分布式电源、储能系统及可控负荷的工作状态, 在充分消纳可再生能源的同时, 平滑了与大电网的联络线功率波动, 实现了系统综合运行成本的显著降低与碳减排指标的实质性改善。

关键词: 低碳经济; 人工智能; 微电网; 优化运行; 深度强化学习; 可再生能源; 碳排放

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.025

引言

全球能源体系正经历一场以低碳化为核心的深刻变革, 构建新型电力系统成为实现“双碳”战略目标的关键路径。在此背景下, 微电网作为整合分布式可再生能源的有效载体, 其重要性日益凸显。然而, 高比例可再生能源的接入在提升清洁能源占比的同时, 也因其固有的间歇性与波动性, 对微电网的稳定运行与经济调度构成了严峻挑战。传统运行方法在处理源-荷双侧不确定性、提升能源综合利用效率以及实现与配电网友好互动等方面已显乏力。人工智能技术的迅猛发展为破解这些难题提供了全新视角。人工智能凭借其在数据处理、模式识别与复杂优化决策方面的独特优势, 能够深度赋能微电网的优化运行, 通过精准预测、智能调度与自适应控制, 有效提升系统运行的可靠性、经济性与绿色性。面向低碳经济, 研究人工智能赋能微电网优化运行技术^[1], 对于推动能源结构清洁转型、保障能源安全以及促进经济社会可持续发展具有重大的理论价值与现实意义, 是当前能源电力领域的前沿探索方向。

1 国内外研究现状

随着全球能源转型的加速, 微电网作为整合分布式可再生能源的关键载体, 其优化运行技术已成为国内外学术界与工业界共同关注的焦点。在理论研究层面, 传统优化方法如线性规划与非线性规划在处理微电网多

目标、非线性问题时面临计算复杂度高与收敛性不足的挑战。近年来, 人工智能技术凭借其强大的数据驱动与自适应学习能力, 为上述瓶颈提供了突破路径。机器学习与深度学习算法被广泛应用于负荷预测与可再生能源发电预测, 显著提升了微电网日前与实时调度计划的精度与可靠性。与此同时, 强化学习在解决微电网动态经济调度与实时能量管理问题中展现出巨大潜力, 其通过与环境的持续交互自主学习最优控制策略, 有效应对了源荷双侧的随机波动性。

2 面向低碳经济的微电网优化运行模型构建

2.1 微电网系统结构与关键设备建模

微电网作为集成分布式能源的关键载体, 其系统结构通常包含发电、储能、负荷及控制四大核心单元。在面向低碳经济的运行框架下, 发电单元模型着重刻画光伏、风机等可再生能源的随机性与间歇性出力特性, 其输出功率受自然条件制约, 是优化模型中不确定性分析的重要源头。储能系统模型则需表征其充放电效率、循环寿命以及荷电状态等动态约束, 它在平抑可再生能源波动、实现能量时移方面扮演着关键角色。关键负荷被区分为可中断与不可中断类别, 其需求响应的弹性为运行优化提供了调节空间。整个系统的协调运行依赖于能量管理系统这一核心控制设备, 它依据优化算法下达调度指令, 确保系统在满足低碳与经济双重目标下的安全

稳定,如图1所示。

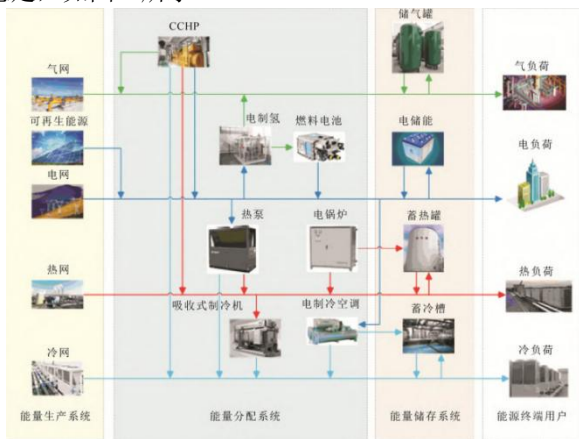


图1 微电网物理架构

2.2 考虑碳减排的多目标优化设计

在低碳经济背景下,微电网的优化运行模型构建需将碳减排目标内化为核心优化维度,如图2所示。传统的单一经济性目标已无法适应可持续发展的要求,因此,本模型构建了包含经济成本与碳排放成本在内的多目标优化设计。该设计旨在实现系统运行总成本的最小化,其中经济成本涵盖分布式发电、储能设备运维及与主网交互的电成本;而碳排放成本则通过引入碳交易机制,将微电网运行过程中的温室气体排放量转化为经济代价,从而利用市场手段引导系统向低碳化运行模式演进。这种将环境外部性内部化的设计,使得优化算法在寻求经济最优的同时,必须主动权衡并抑制碳排放行为。设计的关键在于合理量化不同能源单元,特别是可再生能源与化石能源发电的碳足迹,并以此为基础设定差异化的碳成本系数,如图3所示。通过这种方式,优化模型能够自发地激励光伏等清洁能源的优先消纳,并抑制高碳排放分布式电源的出力,从而在运行策略层面直接响应低碳经济的核心诉求。该多目标框架确保了微电网在复杂运行环境下,其决策能够系统性地协调经济性与环保性,为实现能源的绿色、高效利用提供了理论依据。

2.3 系统运行约束条件分析

微电网优化运行模型的构建需严格遵循系统运行的内在物理规律与安全边界,这些边界条件构成了模型求解的硬性约束。功率平衡约束是核心基础,要求在任一运行时刻微电网内部发电单元(如光伏、风机)、储能系统与负荷需求之间维持瞬时功率平衡,这对于系统频率稳定至关重要。设备运行约束则限制了各单元的安全工作区间,例如燃气轮机或柴油发电机需在其最小技术出力与额定容量之间调节,光伏逆变器出力不能超过当前光照条件下的最大可用功率,储能系统的充放电功率和荷电状态也必须严格控制在允许范围内,以防止设备过载或过度放电损害。电网交互约束规范了微电网与

上级配电网的连接点功率交换,其值通常受到变压器容量和线路传输能力的限制,以确保并网运行的稳定性和对主网的支持或干扰控制。此外,系统还需满足节点电压偏差和线路热稳定等网络约束,尽管在简化模型中可能以公共连接点约束为主要考量,但这些电气安全约束是保证电能质量和供电可靠性的必要条件。这些约束条件,如图4所示。共同构成了一个复杂的可行解空间,任何优化策略都必须在此空间内寻优,从而确保微电网运行在技术可行、安全可靠的前提下,实现低碳经济目标。

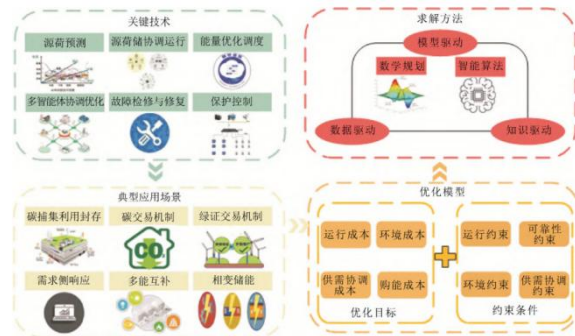


图2 微电网优化运行原理



图3 低碳经济微电网特点

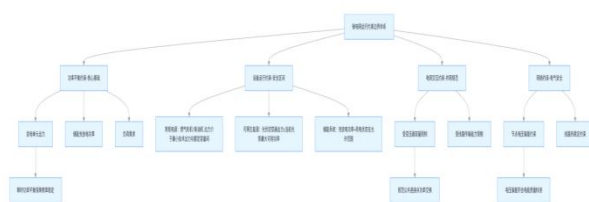


图4 微电网运行约束核心逻辑框架图

3 人工智能赋能的关键技术研究

3.1 基于深度学习的可再生能源与负荷预测技术

在微电网的优化运行框架中,对可再生能源出力和负荷需求的精准预测是实现系统低碳与经济性目标的基础。传统统计方法在处理风光功率与负荷序列的非平稳性与非线性特征时往往表现乏力,而深度学习技术凭借其强大的特征提取与序列建模能力,为这一领域带来了突破性进展。以长短期记忆网络和门控循环单元为代表的循环神经网络结构,能够有效捕捉历史数据中的长

期时间依赖关系，显著提升了短期与超短期预测的精度。与此同时，卷积神经网络通过其局部感知特性，能够从空间维度挖掘分布式光伏阵列之间的关联信息，而基于注意力机制的 Transformer 架构则进一步优化了对长时间序列中关键信息的聚焦能力。这些模型通过对海量历史运行数据与气象信息的学习，构建了从复杂输入到预测输出的高维非线性映射，从而为微电网的日前调度与实时控制提供了可靠的决策依据，有效降低了系统对传统化石能源备用容量的依赖，是赋能微电网低碳化运行的核心技术支柱^[2]。

3.2 基于强化学习的微电网实时优化决策

强化学习为微电网的实时优化决策提供了突破传统模型依赖的全新范式。其核心在于通过与环境的持续交互，智能体自主学习并逼近最优策略，从而有效应对可再生能源出力与负荷需求的强不确定性。在微电网这一特定场景中，状态空间通常被定义为包含光伏、风电等分布式电源的实时出力、各类负荷的功率需求、储能系统的荷电状态以及实时电价信号等关键变量。动作空间则对应着可控分布式发电机组的启停与出力指令、储能系统的充放电功率以及可中断负荷的投切等控制行为。奖励函数被精心设计为引导智能体行为的关键，它往往融合了运行经济性、碳排放量、电网交互功率平滑度以及供电可靠性等多重目标，通过加权求和的方式将低碳经济运行的核心诉求转化为可量化的学习信号。

3.3 多智能体协同优化运行策略

多智能体协同优化运行策略将微电网中分布式发电单元、储能系统及负荷等元素抽象为具有自主决策能力的智能体，其核心在于通过智能体间的局部交互与协调，实现微电网整体运行的全局最优。该策略避免了传统集中式控制对中央处理器的过度依赖，提升了系统在应对可再生能源间歇性与负荷波动时的鲁棒性与可靠性。每个智能体基于局部信息与预设规则进行独立决策，并通过通信网络与其他智能体进行信息共享与协商，从而在无需全局模型的情况下，协同完成功率平衡、电压稳定及经济运行等目标。在具体实现上，常采用基于博弈论或强化学习的协调机制，使得各智能体在追求自身利益最大化的同时，其集体行为能够收敛于帕累托最优解，有效提升微电网的自治水平与能源利用效率。这种分布式架构赋予了微电网更强的灵活性与可扩展性，尤其适用于拓扑结构动态变化的场景。

通过上述技术对比可见，如表 1 所示。本文核心采用“基于强化学习的微电网实时优化决策技术”。该技术既规避了深度学习仅聚焦“预测”的局限性，又突破了多智能体协同对通信与协商的高依赖，同时通过数字孪生技术解决了自身训练安全的核心痛点，能够在适配风光荷不确定性的基础上，直接实现“低碳 - 经济 - 可靠”多目标的实时自主决策，更贴合微电网优化运行的核心诉求。

表 1 微电网低碳优化运行核心技术对比表

技术类型	核心原理	核心优势	适用场景	关键局限性
基于深度学习的预测技术	通过神经网络（LSTM、CNN、Transformer）挖掘历史数据特征，构建非线性映射模型	预测精度高，能捕捉时间 / 空间维度关联，适配风光荷非线性、非平稳特性	日前调度规划、备用容量配置，为优化决策提供数据支撑	仅解决“预测”问题，不直接参与实时控制决策
基于强化学习的实时优化决策	智能体通过与环境交互学习最优策略，融合多目标奖励函数（经济、低碳、可靠）	无需精确数学模型，适配不确定性，支持连续动作空间决策，实时响应能力强	实时功率平衡调节、可再生能源本地消纳、动态控制场景	纯实体训练存在安全风险，需依赖数字孪生搭建训练环境
多智能体协同优化策略	将分布式单元抽象为自主智能体，通过局部交互与协商实现全局最优	去中心化架构，鲁棒性强，可扩展性好，适配拓扑动态变化场景	多微电网协同、分布式电源密集接入、拓扑灵活的微电网	智能体间通信与协商成本高，易出现局部最优而非全局最优

4 微电网碳交易市场机制

4.1 案例场景与参数设置

为验证所提出的低碳导向人工智能算法在微电网运行优化中的有效性，本研究构建了一个包含光伏、风电、储能系统及柴油发电机的典型工业园区微电网案例。系统核心负荷为园区内连续性生产设备，其功率需求呈现出明显的日周期性与季节性波动特征。仿真场景设定为夏典型日，以考察高光伏出力与高负荷需求并存条件下的系统运行特性。光伏与风电的出力数据来源于当地气象站的历史记录与典型气象年数据，负荷数据则基于

园区实际用电曲线进行归一化处理。储能系统采用锂离子电池模型，其充放电效率、自放电率及循环寿命等关键参数均参照主流商业产品技术手册设定。柴油发电机作为保障供电可靠性的关键备用电源，其碳排放强度系数依据《省级温室气体清单编制指南》中的默认值进行设定。各类电源的运维成本、燃料成本以及从上级电网购售电的价格信号，共同构成了优化模型的经济性输入。人工智能算法的核心参数，包括神经网络结构、学习率及探索因子等，均通过大量预实验进行反复调试与确定，以确保算法在求解效率与收敛稳定性之间取得平衡。

4.2 不同场景下的运行结果对比分析

为验证所构建模型的适用性，设置了三种典型运行场景进行对比分析。基准场景遵循传统调度模式，仅以经济成本最低为目标；低碳场景引入阶梯碳交易机制，如图 5 所示。

将碳排放成本内部化，综合优化场景则兼顾经济性与低碳性，并考虑可再生能源出力不确定性。仿真结果表明，如表 2 所示。相较于基准场景，低碳场景的碳排放量显著降低了约 18.7%，但系统总运行成本因碳成本增加而有所上升。综合优化场景通过人工智能算法协调优化，在碳排放量降低 15.2%的同时，成功将系统总运行成本控制在了仅比基准场景高出 3.5%的水平，展现出更优的综合性能，如表 3 所示。这一结果印证了人工智能技术在解决微电网运行中经济与环保目标冲突方面的有效性，其核心在于通过精准预测与多目标优化，实现了不同能源单元间的互补协同与负荷的柔性调节，从而在多重约束下寻得帕累托最优解。

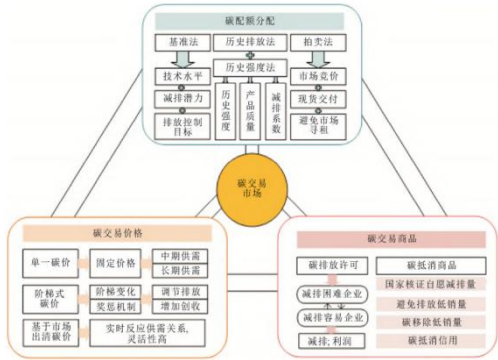


图 5 碳交易市场组成

表 2 核心指标对比表

场景	碳排放量 (相对值, %)	运行成本 (相对值, %)
基准场景	100	100
低碳场景	81.3	118 (参考碳成本增加常规幅度)
综合优化场景	84.8	103.5

表 3 三种场景能源出力占比表

场景	光伏	风电	储能	柴油发电机
基准场景	30%	20%	5%	45%
低碳场景	45%	35%	10%	10%
综合优化场景	40%	32%	10%	18%

5 微电网优化运行展望

在微电网稳定性方面，其包含多次交直流转换过程，交直流子系统间的功率共享易给整个系统带来稳定性挑战，而接口转换器导致的系统可靠性下降、多转换器并联引发的非线性负载行为等问题，需重点关注。分布式发电机的并网渗透会引发诸多电能质量问题^[3]，比如电压波动、谐波失真、电压浪涌及频率偏差等，且其输出的波动性还会产生反向潮流问题。在混合微电网场景中，这些电能质量问题会进一步被放大。

未来可通过估计需求价格弹性来确定碳价格，同时鉴于碳排放权无需实物交割的金融属性^[4]，需建立可信的分布式交易环境以保障透明度。此外，现有微电网碳交易机制往往忽视电力灵活交易的特点，需通过构建电力与碳排放权联合交易的市场机制及调度方法，挖掘用户侧降碳潜力，激励低碳能源利用模式。

人工智能技术已广泛应用于智能微电网优化运行，但目前仍存在鲁棒性差、泛化能力弱、灾难性遗忘、大规模分布式部署难度大等问题。在实际应用中，还呈现出不确定性强、类别不完全可见、学习过程中关键影响因素变化大等缺陷。未来应重点发展可泛化、可协同、可进化且安全可信的人工智能理论与方法，突破智能微电网优化运行技术瓶颈，为我国“双碳”战略目标的达成提供坚实的理论支撑与示范验证^[5]。

参考文献

[1]任甜甜. 并网微电网多目标优化调度及求解算法研究[D]. 西安理工大学, 2024.

[2]史笑宇, 王欣. 计及碳交易的微电网利益博弈研究[C]//吉林省电机工程学会. 吉林省电机工程学会 2024 年学术年会获奖论文集. 吉林省东北电力大学; 东北电力大学, 2024: 580-585.

[3]董奇. 光伏发电对电网电能质量的影响分析[J]. 灯与照明, 2025, 49(06): 134-136+148.

[4]谭志东, 魏健. 低碳转型背景下企业碳排放权会计处理问题探析[J]. 商业经济, 2026, (02): 168-171.

[5]孙嘉麟, 王振宇, 刘宇舒. 双碳目标下县级国土空间减碳规划问题及其优化策略[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2025, 38(04): 74-80.

项目基金：南通理工学院 2025 年大学生创新训练计划项目（编号：XDC2025088）