

# 多源能源微电网优化运行与能量管理技术

王刚

大唐四川发电有限公司, 中国·四川 成都 610000

**摘要:** 随着全球能源结构的转型与“双碳”目标的推进, 以可再生能源为核心的分布式能源系统迅速发展。多源能源微电网作为连接主网与分布式资源的重要载体, 具备灵活组网、就地消纳、高可靠性等优势, 成为现代智能配用电系统的关键组成部分。本文围绕多源能源微电网的优化运行与能量管理技术展开研究, 系统梳理了其系统架构、关键设备建模方法及典型拓扑结构; 构建了包含经济性、环保性、可靠性和能效在内的多目标优化体系, 并分析了各目标间的协调机制; 针对风光出力和负荷需求的不确定性问题, 综述了概率建模、鲁棒优化与模型预测控制等应对策略; 进一步提出了分层、多时间尺度的能量管理框架与调度机制; 对比分析了数学规划、智能算法与分布式优化方法在微电网调度中的适用性。最后, 探讨了当前面临的技术挑战与未来发展趋势, 为多源微电网的实际应用与智能化升级提供理论支撑和技术参考。

**关键词:** 多源能源; 微电网; 优化运行; 能量管理; 不确定性建模; 多目标优化

## Optimal Operation and Energy Management Technology of Multi-Source Energy Microgrid

Wang Gang

Datang Sichuan Power Generation Co., Ltd., China Sichuan Chengdu 610000

**Abstract:** With the transformation of the global energy structure and the advancement of the "dual carbon" goals, distributed energy systems centred on renewable energy are rapidly developing. Multi-source energy microgrids, as important carriers connecting the main grid and distributed resources, have advantages such as flexible networking, local consumption, and high reliability, becoming key components of modern intelligent power distribution and utilisation systems. This paper studies the optimal operation and energy management technologies of multi-source energy microgrids, systematically reviewing their system architecture, key equipment modelling methods, and typical topologies; establishing a multi-objective optimisation system that includes economy, environmental protection, reliability, and energy efficiency, and analysing the coordination mechanisms among these objectives; addressing the uncertainties in wind and solar output and load demand by reviewing strategies such as probabilistic modelling, robust optimisation, and model predictive control; further proposing a hierarchical, multi-time-scale energy management framework and scheduling mechanism; and comparatively analysing the applicability of mathematical programming, intelligent algorithms, and distributed optimisation methods in microgrid scheduling. Finally, the paper discusses current technical challenges and future development trends, providing theoretical support and technical reference for the practical application and intelligent upgrading of multi-source microgrids.

**Keywords:** Multi-source energy; Microgrid; Optimal operation; Energy management; Uncertainty modelling; Multi-objective optimisation

## 0 引言

在“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的背景下, 分布式能源(DER)如光伏、风电、储能、电动汽车等快速发展, 微电网作为一种集成了多种分布式能源、储能装置、负荷以及控制系统的小型自治电力系统, 能够实现局部区域内的电能自平衡与孤岛/并网双模式运行, 有效缓解上述问题。

特别是多源能源微电网——即融合光伏、风电、燃气轮机、生物质能、储能系统等多种能源形式的微电网, 因

其能源互补性强、供电可靠性高、运行灵活性好, 正成为新型电力系统建设的重点发展方向之一。

## 1 多源能源微电网系统架构与组成

### 1.1 微电网基本概念与分类

微电网是一种由分布式电源、储能系统、可控负荷、保护与控制装置构成的小型发配电系统, 能够在并网或孤岛模式下自主运行, 并通过公共耦合点(PCC)与主电网连接。

依据运行方式可分为:

并网型微电网：正常情况下与主网互联，交换功率；故障时可断开形成孤岛。

独立型微电网：不依赖主网，常用于偏远地区或海岛供电。

混合型微电网：兼具并网与离网能力，支持无缝切换。

按应用场景划分，包括城市商业园区微电网、工业厂区微电网、农村离网微电网、军事基地微电网等。

## 1.2 关键设备建模基础

光伏发电系统通常根据光照强度和温度建立输出功率模型，其出力具有明显的日周期特性且受天气影响较大；风力发电则基于风速-功率曲线进行分段描述，反映切入风速、额定功率与切出风速之间的非线性关系。储能系统建模重点关注荷电状态（SOC）的动态变化过程，考虑充放电效率、容量限制及循环寿命，同时引入充放电互斥约束以符合物理特性。对于燃气轮机、柴油发电机等可控电源，常采用二次或线性成本函数来表征燃料消耗，并结合最小启停时间、爬坡速率等运行约束反映其动态响应能力。电力电子变换装置如逆变器虽不参与能量生产，但在交直流接口中起关键作用，通常以效率恒定或损耗线性化方式简化处理。负荷侧则根据可调性分为刚性负荷与柔性负荷，后者可通过需求响应机制参与调度。这些简化模型在保留设备核心特性的前提下降低了优化问题的复杂度，为后续多目标优化与不确定性分析提供了可行的数学基础，广泛应用于日前调度与实时控制中。

## 1.3 微电网典型拓扑结构

微电网的典型拓扑结构主要分为交流、直流和交直流混合三种基本形态，共同支撑着系统的灵活构建与高效运行。交流微电网是目前应用最广泛的形式，采用交流母线连接光伏逆变器、风电变流器、储能PCS及负荷，其优势在于与现有配电网标准兼容，技术成熟度高，适用于大多数工业和商业园区。直流微电网则通过直流母线直接接入光伏组件、蓄电池及直流负荷，显著减少了AC/DC变换环节，提高了能源利用效率，特别适合数据中心、电动汽车充电站等直流负载密集的场景。交直流混合微电网则融合了前两者的优势，利用双向AC/DC换流器实现交流子网与直流子网的功率互济，既能为交流电动机等传统设备供电，又能高效对接直流型分布式电源与负载，代表了未来微电网架构的重要发展方向。在网络形态上，这些拓扑可采用辐射状、环状或网状等连接方式，其中辐射状结构简单可靠，环状和网状结构供电可靠性更高但保护配置更

复杂。这些结构设计通过分层分区、模块化组合，增强了系统的可扩展性与故障隔离能力，为多源能源的协同管理与优化运行提供了坚实的物理基础。

## 2 多源微电网优化运行的目标与约束

### 2.1 运行目标体系构建

经济性目标是驱动微电网商业化运营的核心动力，其宗旨是在保障供电安全的前提下，最小化系统运行的总成本或最大化其运营收益。其成本构成复杂，主要包括：以燃气轮机、内燃机为代表的各类分布式电源的发电成本，这通常涉及燃料费用以及与出力相关的运维成本，其成本函数常以二次函数或分段线性函数表述。此外，随着需求响应技术的成熟，为激励柔性负荷参与调度而产生的补偿费用也成为经济性目标的重要组成部分。因此，经济性目标函数通常构建为上述各项成本在调度周期内的总和的最小化。

#### 2.1.1 环保性目标

随着“双碳”战略的深入推进，环保性目标已成为与经济性目标并重甚至优先的关键维度。不同电源的排放特性差异显著：可再生能源发电过程几乎为零排放，通过赋予清洁能源更高的调度优先级，优化模型能够引导系统向更低碳的运行方式演进。

#### 2.1.2 可靠性目标

可靠性是微电网安全运行的底线，尤其是在孤岛模式下，其重要性更为凸显。该目标旨在确保对系统内关键负荷持续、高质量的电力供应，降低停电概率与停电损失。提升可靠性的手段包括合理配置旋转备用、维持储能系统适量的后备能量以及优化网架结构等。

#### 2.1.3 能效目标

能效目标侧重于提升能源的综合利用效率，该目标函数可以表示为系统总输出能量（包括电、热、冷）与总输入能源（如燃气、太阳能）的比值最大化。实现高能效运行意味着用更少的初级能源消耗满足用户多元化的用能需求，是实现节能降耗的关键途径。

## 2.2 多目标协调与权衡机制

多源微电网优化运行中的多个目标之间往往存在冲突，如追求经济性可能牺牲环保性，提高可靠性可能导致成本上升，因此必须建立有效的协调与权衡机制。通常采用加权求和法将多目标转化为单目标，通过设定不同权重反映决策偏好，实现综合优化；也可采用 $\epsilon$ -约束法，将次要目标转化为约束条件，在保障其阈值的前提下优化主目标；此外，帕累托前沿分析法可生成一组非劣解集，全

面展现各目标间的权衡关系, 供决策者根据实际需求选择最优折中方案。结合层次分析法或熵权法等客观赋权方法, 可进一步提升权重设置的科学性与合理性, 从而在复杂多变的运行环境中实现经济、环保、可靠与高效等多目标的协同优化。

### 2.3 系统约束条件

多源微电网优化运行的求解必须在严格的系统约束条件下进行, 这些约束共同构成了优化问题的可行域。其核心是每个时刻都必须满足的系统有功功率平衡约束, 确保所有发电单元、储能系统及主网交互功率之和与负荷及网损相匹配。

## 3 不确定性因素建模与应对策略

### 3.1 不确定性建模方法

目前主流方法包括概率建模、模糊集理论、区间分析、鲁棒优化与随机规划等。概率建模基于历史数据统计特性, 假设不确定变量服从特定分布(如正态分布、Beta分布), 并采用机会约束规划来保证关键约束在一定置信水平下成立。模糊集理论则适用于缺乏精确数据的场景, 通过隶属函数描述变量的“模糊”状态。区间模型仅需已知变量上下界, 计算简便但结果偏保守。鲁棒优化致力于在最恶劣的不确定性实现下仍能保证系统安全, 无需假设具体分布形式, 适用于对安全性要求极高的场合。随机规划则通过生成多个典型场景及其发生概率, 构建期望值目标函数, 以实现风险与收益的平衡。

### 3.2 应对策略对比分析

针对不同建模方式, 相应的应对策略也有所差异。例如, 基于概率模型的优化常结合滚动时域优化或模型预测控制(MPC)框架, 利用最新的预测信息不断修正调度指令, 提升实时适应能力。鲁棒优化通常采用列与约束生成算法求解, 适用于日前调度阶段制定抗干扰能力强的基准方案。而随机规划适合用于多阶段决策过程, 通过场景树模拟不确定性演化路径。在实际应用中, 常采用混合策略, 如“两阶段优化”: 第一阶段基于鲁棒或随机方法制定日前计划, 第二阶段在实时运行中借助MPC进行动态调整, 从而兼顾调度的安全性、经济性与灵活性。

## 4 能量管理框架与优化调度策略

### 4.1 分层控制架构设计

能量管理系统(EMS)扮演着“大脑”角色, 负责对系统内各类分布式电源、储能装置、负荷及电网交互进行全局监控、预测分析与优化决策。为实现复杂系统的协调控制, 现代微电网普遍采用分层控制架构。该架构通常分

为三层: 上层为优化调度层, 基于预测信息和系统模型制定分钟级到小时级的全局优化计划; 中层为协调控制层, 负责执行功率分配、电压频率调节、储能充放电管理等功能, 响应时间为秒级至分钟级, 常用下垂控制、虚拟同步机等技术实现动态平衡; 底层为本地控制层, 直接面向电力电子设备, 完成逆变器调制、保护动作等毫秒级快速响应任务, 确保电能质量与设备安全。

### 4.2 多时间尺度调度机制

日前调度基于24小时预测数据制定发电计划, 并参与市场申报; 日内滚动调度每隔15分钟或更短时间更新预测并修正计划, 以减小预测误差带来的偏差; 实时调度则通过模型预测控制(MPC)等方法, 在线调整控制指令, 补偿实际运行中的功率不平衡。这种“日前一日内一实时”逐级细化的调度模式, 有效提升了系统对不确定性的适应能力。

### 4.3 协调控制策略

在具体控制策略方面, 主从控制通过指定主控单元维持系统稳定, 结构清晰但依赖中心节点; 对等控制使各单元地位平等, 更具冗余性与扩展性; 而基于多代理系统(MAS)或区块链的协调机制, 则支持去中心化协同与点对点能量交易, 代表了未来智能微电网的发展方向。多种策略的融合应用, 推动微电网向更灵活、可靠与智能化的方向演进。

## 5 优化求解方法与算法应用

### 5.1 智能优化算法

当系统复杂度升高或目标函数不可导时, 智能优化算法因其强大的全局搜索能力而被广泛应用。遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)、差分进化(DE)等启发式算法不依赖梯度信息, 能够跳出局部最优, 在处理离散变量、非凸可行域等问题上表现出良好适应性。近年来, 深度强化学习(DRL)等人工智能方法逐渐引入微电网调度领域, 能够在未知或动态环境中自主学习控制策略, 尤其适合实时滚动优化与自适应控制, 但其训练成本高、可解释性弱仍是当前面临的挑战。

### 5.2 分布式优化方法

随着微电网由单一系统向集群化、区域化发展, 集中式优化面临通信负担重、隐私保护难等问题, 分布式优化方法应运而生。交替方向乘子法(ADMM)、一致性算法等通过将全局问题分解为多个子问题, 在本地迭代求解并交换边界信息, 实现去中心化的协同优化, 有效提升了系统的扩展性与鲁棒性, 特别适用于多微网互联或虚拟电厂

聚合运行场景。

### 5.3 方法选择建议与适用性分析

方法的选择需结合具体应用场景：对于结构明确、追求计算效率的日前调度，优先采用 MILP 等数学规划方法；对于高度非线性和动态环境，可选用智能算法进行求解；而在大规模系统协同中，则应转向分布式优化架构。未来趋势将是多种方法融合互补，构建兼具精度、速度与灵活性的综合求解体系。

## 6 关键挑战与发展趋势

多源能源微电网在快速发展的同时，仍面临诸多关键挑战。高比例可再生能源接入带来的强波动性和低惯性问题，对系统的频率与电压稳定控制提出了更高要求；储能成本较高且寿命有限，制约了其在长时间尺度调节中的广泛应用；负荷与新能源出力的预测精度仍有待提升，影响优化调度的实际效果；此外，多主体间的利益协调机制不完善、信息通信安全风险上升以及标准体系不统一等问题也阻碍了微电网的规模化推广。在技术层面，如何实现“源-网-荷-储-氢”多能协同、提升系统韧性与智能化水平成为亟待突破的瓶颈。

未来，多源微电网将朝着深度融合、智能高效的方向发展。数字孪生技术将实现系统全生命周期的精细化管理与故障预判；人工智能深度融入能量管理，提升预测与

自主决策能力；基于区块链的点对点能源交易促进去中心化市场形成；模块化设计和即插即用接口推动设备标准化与快速部署；微电网集群与虚拟电厂模式逐步普及，增强参与电力市场的竞争力。同时，绿氢制储与碳足迹追踪等低碳技术的集成，将进一步支撑“双碳”目标下的可持续发展。

### 参考文献：

- [1] 艾欣, 邓玉辉, 黄仁乐. 多能互补微电网系统优化运行研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022,46(15):178-192.
- [2] Hatzigiorgiou N, Asano H, Irvani R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007,5(4):78-94.
- [3] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网综合控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2009,29(19):55-64.
- [4] Zhang C, Xu Y, Dong ZY, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(2):1865-1877.
- [5] 丁明, 王骏, 杨为. 含多种分布式电源的微电网优化运行研究[J]. 电力系统自动化, 2016,40(10):1-9.

作者简介：王刚（1991.06-），男，汉族，四川省乐山市，大学本科毕业，工程师，研究方向：电力电子、水能动力。