

基于改进线性化 ADMM 的多微网经济运行 分布式协调优化

黄堃^{1,2}, 付明¹, 翟家祥³, 华昊辰³

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 河海大学 电气与动力工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 传统多微网系统的集中式优化策略计算时间长, 而以交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 为代表的分布式优化算法求解效率取决于目标函数的拉格朗日增广函数的求解难度, 很难适用于复杂多微网系统。针对该问题, 提出了一种基于非精确广义不定邻近交替方向乘子法 (the inexact generalized ADMM with indefinite proximal term, IGADMM-IPT) 的多微网系统分布式协调优化方案。首先, 构建多微网系统的分层优化架构和各可调节设备动态模型; 然后, 基于可再生能源出力、负荷需求的差值和可调节设备出力阈值确定各微网可共享发电量和储能容量; 接着, 基于多微网系统运行成本最低构建全局共享目标函数, 利用 IGADMM-IPT 对该优化问题迭代求解; 最后, 在 8 个微网和一个直连设备群通过公共母线互联的场景进行仿真。结果显示, 在一天内利用 IGADMM-IPT 获取多微网系统运行成本最低优化方案所需时间比 ADMM 少 21.38%。

关键词: 多微网系统; 可再生能源; 分布式优化

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202308028

0 引言

大规模可再生能源接入电力系统, 势必会给予其运行的安全性、经济性和灵活性带来挑战^[1]。微网作为一种集成管理各类可调节设备和负荷侧灵活性资源的平台, 可以在电力系统安全稳定运行的同时实现经济效益最大化^[2]。然而, 单一微网只能在有限范围内调节电力系统的供需不平衡程度, 随着可再生能源占比的提高, 微网的供需平衡将会受到可再生能源出力大幅度波动的影响^[3-4]。

多个微网通过集群互联形式构建的多微网系统, 可以通过协调优化的方式有效应对单一微网调节容量不足的问题^[5-10]。文献^[5]提出一个分布式多能源管理框架, 用于互联沼气-太阳能-风能微电网的协调运行。文献^[8]基于日前调度计划和投标合作交易方案促进微网之间功率互享, 提

高了多微网系统整体的经济效益。通过协调本地微网与主电网的传输电量, 基于一致性理论、随机演化动力学和动态分区准则, 可以实现多微网系统整体运营成本最小^[11-13]。然而随着可再生能源在多微网系统中占比的提升, 仅以运行成本最低为协调优化目标不再适用于当前的研究, 灵活性成为电力系统中不可忽视的指标。

灵活性是指当多微网系统存在可再生能源出力和负荷需求波动等不确定性因素时, 通过其配备的可调节资源保持供需平衡的能力, 即多微网系统对电能生产和消费预期或意外变化的适应能力^[14]。当前关于电力系统灵活性的研究主要集中在柔性资源建模和调度以及系统柔性评估^[15-20]。文献^[15]基于灵活性电池储备模型, 提出一种针对多微网系统灵活性备用容量的评估方法。考虑到各微网的潜在灵活性和隐私保护的需求, 基于可再生能源出力削减、甩负荷等可接受的运行不确定性阈值, 建立微网可共享资源模型, 该模型的充放电电量表示微网的供需不平衡值^[21-23]。然而当前关于多微网系统的研究大多针对经济性进行优化^[12-13], 如何在考虑运行灵活性的情况下实现

收稿日期: 2023-08-08; **修回日期:** 2024-01-25。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (面向高比例新能源消纳的多微网系统协同优化调控技术研究及示范, 4000-202219058A-1-1-ZN)。

经济性最优协调调度是当前亟须解决的难题。

选择合适的优化方法可以有效降低基于运行灵活性的多微网系统经济性最优协调调度的决策难度，当前多微网系统的优化方式主要有集中式和分布式^[24]。集中式的通信计算量大、对用户隐私的保护性能差，随着微网维度的增加和可再生能源渗透率的提高，难以适用于当前的多微网系统^[24-26]。分布式优化允许每个微网基于各自的目标独立运行，并通过全局控制器迭代计算进行协调优化，其相比于集中式优化所需的计算容量少，同时微网的个人数据没有离开本地，有效保护了用户隐私。因此，分布式优化成为当前研究的焦点之一。文献^[27]提出一种基于主从博弈的多主体投资多微网系统优化配置方法。文献^[28]提出一种基于长短期记忆网络和条件生成对抗网络的多微网数据驱动两阶段分布鲁棒协同优化调度模型。为了实现县域内不同负荷特性的微电网可再生能源优势互补，提高消纳率，文献^[29]提出了基于交替方向乘子法（alternating direction method of multipliers, ADMM）的多场景县域多微电网交互运行策略。然而，由于微网之间交互信息的隐私保护要求，微网的柔性资源很难量化，如何通过联络线实现柔性资源的相互作用，并将柔性资源的灵活性与互联微网的协调优化相结合，这有待进一步研究。

针对当前研究的不足，本文提出一种基于非精确广义不定邻近 ADMM（the inexact generalized ADMM with indefinite proximal term, IGADMM-IPT）的多微网系统经济运行分布式协调优化策略。首先，为了简化多微网系统内微网间能量交互复杂性，将多微网系统虚拟地划分为上下两层，其上层为直连设备群，下层为互联微网，构建上下两层内各可调节设备动态模型；然后将可再生能源出力和负荷需求的差值定义为微网灵活性需求，综合考虑微网运行不确定性，基于微型燃气轮机和电池储能的调节能力，确定各微网可共享发电量和储能容量，以可共享发电量和储能容量为各微网可提供充放电电量；接着以多微网系统经济运行为目标，制定全局共享目标函数；最后利用 IGADMM-IPT 获得多微网系统最优分布式优化策略。

1 研究场景

本文的研究对象是由多个微网和一个直连设备群互联构成的多微网系统，如图 1 所示。该多微网系统具有如下特征：多微网系统运行在并网模式，所有微网和直连设备群连接在公共母线上，公共母线通过变压器与主电网连接；每个微网配备有光伏、微型燃气轮机、储能电池和负荷；直连设备群配备微型燃气轮机、储能电池和负荷；每个微网可以按照指令协调各微网内部功率及各微网之间的交互电量。

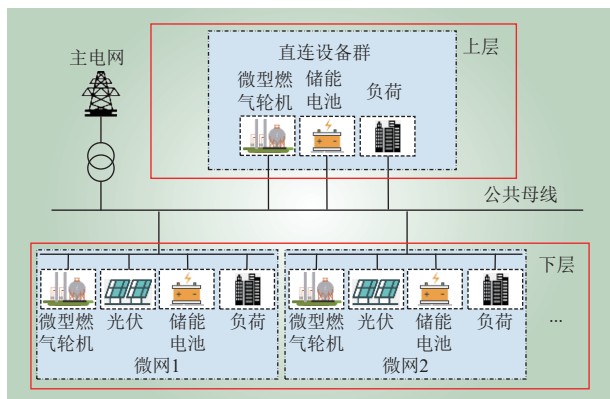


图 1 多微网系统场景

Fig. 1 Multi-microgrid system scenario

在实际多微网系统中，微网间、微网与主电网间都可以进行能量交互，为了简化多微网系统内功率交互的复杂性，本文将多微网系统架构虚拟分为 2 层，如图 1 所示。直连设备群定义为上层，微网定义为下层，下层只允许与上层进行能量交互。因此，下层内的微网间能量交互必须通过上层实现。

2 多微网系统模型

光伏出力和负荷需求的波动都影响微网供需平衡，同时考虑到微网信息传输的隐私保护要求，仅以多微网系统整体运行成本最低为目标制定协调优化策略无法保障系统供需平衡。本章基于多微网内可调节设备模型，以光伏出力和负荷需求差值作为微网灵活性需求，综合考虑可再生能源出力削减和甩负荷的风险，构建微网可共享资源模型。

2.1 可调节设备模型

微型燃气轮机通过燃烧天然气产生电能，其出力 and 约束条件^[30]为

$$P_{G,i}(t) = \eta_{G,i} H_G S_{G,i}(t) \quad (1)$$

$$P_{G,i,\min} \leq P_{G,i}(t) \leq P_{G,i,\max} \quad (2)$$

式中： $P_{G,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网微型燃气轮机的出力； $\eta_{G,i}$ 为第 i 个微网微型燃气轮机的发电效率； H_G 为天然气低热值； $S_{G,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网微型燃气轮机消耗燃气量； $P_{G,i,\min}$ 和 $P_{G,i,\max}$ 分别为第 i 个微网微型燃气轮机发电功率上、下限。

电池储能通过充放电实现负荷和发电设备之间的转换，其出力 and 约束条件^[31]为

$$P_{BES,i}(t) = P_{BES,i,\max} + r_1 [P_{load,i}(t) - P_{BES,i,\max}] + r_2 [SOC_{BES,i,\text{ref}} - SOC_{BES,i}(t)] V_{BES,i} Q_{BES,i} \quad (3)$$

$$P_{BES,i,\min} \leq P_{BES,i}(t) \leq P_{BES,i,\max} \quad (4)$$

$$SOC_{BES,i,\min} \leq SOC_{BES,i}(t) \leq SOC_{BES,i,\max} \quad (5)$$

式中： $P_{BES,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网电池储能的输出功率； $P_{load,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网负荷需求； r_1 为负荷需求与电池储能输出功率差值的参数； $SOC_{BES,i,\text{ref}}$ 为第 i 个微网电池储能荷电状态的参考值； $SOC_{BES,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网电池储能的荷电状态； r_2 为电池储能荷电状态跟踪基准值的参数； $V_{BES,i}$ 为第 i 个微网电池储能的开路电压； $Q_{BES,i}$ 为第 i 个微网电池储能容量； $P_{BES,i,\min}$ 和 $P_{BES,i,\max}$ 分别为第 i 个微网电池储能的最小和最大输出功率； $SOC_{BES,i,\min}$ 和 $SOC_{BES,i,\max}$ 分别为第 i 个微网电池储能的最小和最大的荷电状态。

2.2 灵活性供需模型

灵活性是用来反映多微网系统快速适应负荷需求和光伏出力变化能力的一种指标。在含高比例可再生能源的多微网系统中，可再生能源出力受光照、风速的影响存在差异且波动较大，同时多样化的用户特性也会增加负荷需求的不确定性，将负荷需求和光伏出力的差值定义为净负荷，净负荷的值即为多微网系统的灵活性需求，其灵活性需求^[32]可表示为

$$F_i(t) = P_{\text{fore},i}(t+1) - P_{\text{fore},i}(t) \quad (6)$$

$$P_{\text{fore},i}(t) = P_{\text{fore},\text{load},i}(t) - P_{\text{fore},\text{PV},i}(t) \quad (7)$$

式中： $F_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网的灵活性需求； $P_{\text{fore},i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网净负荷的预测值； $P_{\text{fore},\text{load},i}(t)$ 和 $P_{\text{fore},\text{PV},i}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个微网负荷需求和光伏出力的预测值。

微网供需平衡主要通过其配备的微型燃气轮机和电池储能等可调节设备来实现，在满足微网灵活性需求的前提下，微网可以将富余的发电和储能容量共享给相邻微网，这些可共享的发电和储能容量即微网可调节设备灵活性资源，可调节设备灵活性资源^[21]可表示为

$$F_{G,\text{up},i}(t) = P_{G,i,\max} - P_{G,i}(t) \quad (8)$$

$$F_{G,\text{down},i}(t) = P_{G,i}(t) - P_{G,i,\min} \quad (9)$$

$$F_{BES,\text{up},i}(t) = P_{BES,i,\max} - P_{BES,i}(t) \quad (10)$$

$$F_{BES,\text{down},i}(t) = P_{BES,i}(t) - P_{BES,i,\min} \quad (11)$$

$$F_{\text{up},i}(t) = F_{G,\text{up},i}(t) + F_{BES,\text{up},i}(t) \quad (12)$$

$$F_{\text{down},i}(t) = F_{G,\text{down},i}(t) + F_{BES,\text{down},i}(t) \quad (13)$$

式中： $F_{G,\text{up},i}(t)$ 、 $F_{BES,\text{up},i}(t)$ 和 $F_{G,\text{down},i}(t)$ 、 $F_{BES,\text{down},i}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个微网微型燃气轮机和电池储能的可用向上和向下灵活性； $F_{\text{up},i}(t)$ 和 $F_{\text{down},i}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个微网的可用向上和向下灵活性。

2.3 系统运行不确定性

可再生能源的历史数据和预测数据分析表明光伏出力预测误差的概率分布特征近似服从正态分布^[33]。而负荷需求的预测技术相对成熟，其误差可以忽略不计^[34]。因此，本文主要考虑光伏出力预测 f_{epv} 的误差^[21]为

$$f_{\text{epv}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

式中： x 为光伏出力； μ 和 σ 分别为联合预测误差的期望值和标准差。

为了确定每个微网内部灵活性资源是否充足，本文采用微网运行不确定性这一概念^[35]。微网运行不确定性包括可再生能源出力削减风险和甩负荷风险，即可再生能源削减和甩负荷的概率和期望。在系统运行过程中，上行调节能力不足将导致用户甩负荷，而下行调节能力不足则会导致可再生能源的削减^[31]。由于运行不确定性是个概率问题，实际运行中极低概率发生的故障，比如光照完全消失、瞬间停电等，在本文的优化运

行中不予考虑, 这个允许不考虑的运行不确定性比例即给运行不确定性预留的阈值, 记为 $\varphi_{\text{thr}}(t)$, 该阈值根据微网内微型燃气轮机和电池储能的可用容量得出。微网可再生能源削减、甩负荷的风险和阈值可表示为

$$E_{\text{rej},i}(t) = \int_{F_{\text{up},i}(t)}^{+\infty} f_{\text{EPV}} dx \quad (15)$$

$$E_{\text{cut},i}(t) = \int_{-\infty}^{F_{\text{down},i}(t)} f_{\text{EPV}} dx \quad (16)$$

$$\varphi_{\text{thr}}(t) = [\delta_1 F_{\text{up},i}(t) + \delta_2 F_{\text{down},i}(t)] / F_{\Sigma} \quad (17)$$

式中: $E_{\text{rej},i}(t)$ 和 $E_{\text{cut},i}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个微网甩负荷的期望值和光伏出力削减的期望值; δ_1 和 δ_2 分别为微型燃气轮机可用容量和电池储能可用容量的修正系数; F_{Σ} 为多微网系统中所有可调节设备的出力。

2.4 微网可共享资源模型

互联微网可以通过公共母线交互各微网的灵活性资源, 提高多微网系统能源利用效率和运行灵活性。在分析可再生能源出力不确定性和发电调节能力的基础上, 考虑到可再生能源预测误差的概率特性和系统柔性资源, 以微网可共享的储能电池容量和微型燃气发电机容量为充电量和放电量, 制定微网可共享资源模型。微网对柔性资源的局部需求主要用于补偿负荷需求的连续波动和可再生能源出力的预测误差。因此, 由微网提供的可用放电功率 $P_{\text{BES},\text{dis},i}(t)$ 可表示为

$$P_{\text{BES},\text{dis},i}(t) = F_{\text{up},i}(t) - [\Delta P_{\text{fore},\text{load},i}(t) + (1 - \varphi_{\text{thr}}(t)) \text{Inv}(E_{\text{rej},i}(t))] \quad (18)$$

$$\Delta P_{\text{fore},\text{load},i}(t) = P_{\text{fore},\text{load},i}(t+1) - P_{\text{fore},\text{load},i}(t) \quad (19)$$

式中: $\Delta P_{\text{fore},\text{load},i}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网负荷需求的顺序波动所需的向上灵活资源容量; $\text{Inv}(E_{\text{rej},i}(t))$ 为可再生能源削减风险 $E_{\text{rej},i}(t)$ 的反函数, 即 $\text{Inv}(E_{\text{rej},i}(t)) = [E'_{\text{rej},i}(t)]^{-1}$ 。

当 $P_{\text{BES},\text{dis},i}(t) > 0$ 时, 意味着在当前运行决策下, 在满足自身需求的前提下, 有剩余的发电容量可以提供给相邻微网, 容量为 $P_{\text{BES},\text{dis},i}(t)$; 当 $P_{\text{BES},\text{dis},i}(t) < 0$ 时, 意味着在当前的运营决策下, 微网发电容量不够, 需要其他微网的支持, 或者需要调整调度策略, 例如增加从主网购买的电力或微型燃气轮机出力。

以相同的方式, 由微网提供的可用充电功率 $P_{\text{BES},\text{chr},i}(t)$ 可表示为

$$P_{\text{BES},\text{chr},i}(t) = F_{\text{down},i}(t) + [\Delta P_{\text{fore},\text{load},i}(t) - (1 - \varphi_{\text{thr}}(t)) \text{Inv}(E_{\text{cut},i}(t))] \quad (20)$$

当 $P_{\text{BES},\text{chr},i}(t) > 0$ 时, 表示微网有剩余的储能容量可以供应给相邻微网, 容量为 $P_{\text{BES},\text{chr},i}(t)$; 当 $P_{\text{BES},\text{chr},i}(t) < 0$ 时, 意味着在当前的运营决策下, 微网储能容量不够, 需要其他微网的支持, 或者需要调整调度策略, 例如增加向主网出售的电力。

3 多微网系统能量协调优化目标函数

多微网系统的上层目标函数以多微网系统整体运行成本最低为目标, 分别考虑上下两层交互电量损耗成本和上层自身可调节设备运行成本, 其表达式为

$$J_{\text{up}}(T) = \sum_{i=1}^M J_{\text{tran},i}(T) + J_{\text{BES},0}(T) + J_{\text{G},0}(T) + J_{\text{tran},0}(T) \quad (21)$$

下层目标函数以各微网运行优化为目标, 仅考虑本地可调节设备的运行成本, 其表达式为

$$J_{\text{bottom},i}(T) = J_{\text{BES},i}(T) + J_{\text{G},i}(T) \quad (22)$$

式中: $J_{\text{up}}(T)$ 为 T 时段内上层运行成本; $J_{\text{bottom},i}(T)$ 为 T 时段内下层第 i 个微网的运行成本; $J_{\text{tran},i}(T)$ 为 T 时段内下层第 i 个微网与上层的交互成本,

$J_{\text{tran},i}(T) = \sum_{t=T-1}^T \xi_i P_{\text{tran},i}(t)$; ξ_i 为下层第 i 个微网与上层之间的交易电价; $P_{\text{tran},i}(t)$ 为 t 时刻下层第 i 个微网与上层的交互电量; $J_{\text{BES},i}(T)$ 为 T 时段内下层第 i 个微网电池储能损耗成本; $J_{\text{G},i}(T)$ 为 T 时段内下层第 i 个微网微型燃气轮机运行成本; $J_{\text{BES},0}(T)$ 、 $J_{\text{G},0}(T)$ 和 $J_{\text{tran},0}(T)$ 分别为 T 时段内上层电池储能损耗成本、微型燃气轮机运行成本以及上层与主电网交互成本, $J_{\text{tran},0}(T) = \sum_{t=T-1}^T \xi_0 P_{\text{tran},0}(t)$; ξ_0 为上层与主电网的交易电价; $P_{\text{tran},0}(t)$ 为 t 时刻上层与主电网交互电量。

本文的研究目标是通过协调各微网传输功率来实现多微网系统的最优运行, 而多微网系统群内交易聚焦的是电力市场竞价策略的研究, 因此

本文的多微网系统内交易价格 ξ_i 设置为0。

综合所有子微网的运行成本，可构建不同权重系数的全局成本函数为

$$J_{\text{total}}(t) = \sum_{i=0}^M [J_{G,i}(t) + J_{\text{BES},i}(t)] + J_{\text{tran},0}(T) \quad (23)$$

供需平衡是多微网系统运行的基本要求，下层内微网被虚拟构建为电池储能，其充放电量必须等于微网内部的供需不平衡量；而上层除了内部的发电和用电，下层中微网的充放电也需要通过上层进行传输，其供需平衡公式需要综合考虑下层微网传输电量。

上层微网供需平衡公式可表示为

$$P_{\text{tran},0}(t) + \sum_{i=1}^M [P_{\text{tran},i}(t)] + P_{\text{BES},0}(t) + P_{G,0}(t) - P_{\text{Load},0}(t) = 0 \quad (24)$$

$$P_{\text{tran},i}(t) = \begin{cases} P_{\text{BES},\text{dis},i}(t), & P_{\text{tran},i}(t) > 0 \\ P_{\text{BES},\text{chr},i}(t), & P_{\text{tran},i}(t) < 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中： M 为下层微网的数量； $P_{\text{BES},0}(t)$ 为 t 时刻上层电池储能出力； $P_{G,0}(t)$ 为 t 时刻上层微型燃气轮机出力； $P_{\text{Load},0}(t)$ 为 t 时刻上层负荷需求。

下层微网供需平衡公式可表示为

$$P_{\text{tran},i}(t) + P_{G,i}(t) + P_{\text{BES},i}(t) + P_{\text{PV},i}(t) - P_{\text{Load},i}(t) = 0 \quad (26)$$

每个微网通过将其本地目标函数最小化，在其限定的有效范围内实现最优运行，微网子目标函数如下。

微型燃气轮机运行成本为

$$J_{G,i}(t) = \omega_1 [P_{G,i}(t)]^2 + \omega_2 P_{G,i}(t) + \omega_3 \quad (27)$$

式中： ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为微型燃气轮机成本系数。

电池储能的循环损耗模型^[36]为

$$Q_{\text{BES},i,\text{loss}}(t) = P_{\text{BES},i}(t) \Delta t / 2 Q_{\text{BES},i} N_{\text{cyc},i} \quad (28)$$

式中： $Q_{\text{BES},i,\text{loss}}(t)$ 为 t 时刻第 i 个微网电池储能的容量损耗； $N_{\text{cyc},i}$ 为第 i 个微网电池储能的循环次数。

电池储能的损耗成本^[36]为

$$J_{\text{BES},i}(T) = \sum_{t=T-1}^T \left[\frac{C}{\eta_{\text{BES},i} Q_{\text{BES},i}} Q_{\text{BES},i,\text{loss}}(t) \right] \Delta t \quad (29)$$

式中： $\eta_{\text{BES},i}$ 为第 i 个微网电池储能的充放电效率；

C 为电池储能的安装成本。

4 基于非精确广义不定邻 ADMM 的分布式优化求解方法

由于上层优化目标与下层优化目标之间会产生利益冲突，上层与下层围绕多微网系统与主电网的交互电量进行博弈。传统的集中式优化方法需要高性能计算能力来处理大量数据，随着执行时间和系统维度的增长可能会导致结果不收敛，而分布式优化可以有效解决多节点内大量数据处理和隐私保护的问题。因此，本文采用 ADMM 解决多微网系统分布式协调优化这一问题。

传统的 ADMM 算法的求解效率依赖目标函数的增广拉格朗日函数求解难度，为了提高 ADMM 的适用性，本文采用 IGADMM-IPT，通过线性化 ADMM，保证其子问题具有闭式解，提高其求解速度^[37]。

基于式(23)，多微网系统目标函数可分解为多个自变量 $X = \{x_1, \dots, x_m\} = \{P_{G,0}(t), \dots, P_{G,i}(t), P_{\text{BES},0}(t), \dots, P_{\text{BES},i}(t), P_{\text{tran},0}(t)\}$ ，所有自变量受式(24)和(26)的线性等式约束，因此多微网系统目标函数可表示为

$$\begin{cases} \min \sum_{m \in M} f_m(x_m) \\ \text{s.t. (24) (26)} \end{cases} \quad (30)$$

式中： x_m 为可变量分量分解后的第 m 个优化变量； f_m 为第 m 个子优化变量对应的子目标函数。

引入拉格朗日乘子 λ ，可将模型改写为不定邻近线性化增广拉格朗日函数，即

$$\begin{cases} x^{(k+1)} = \arg \min \left\{ \mathcal{L}_\beta(x^{(0)}, y^{(k)}, \lambda^{(k)}) + \frac{1}{2} \|x^{(0)} - x^{(k)}\|^2 \right\} \\ y^{(k+1)} = \arg \min \left\{ \mathcal{L}_\beta(x^{(k+1)}, y^{(0)}, \lambda^{(k)}) + \frac{1}{2} \|y^{(0)} - y^{(k)}\|^2 \right\} \\ \lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k+\frac{1}{2})} - \beta(Ax^{(k+1)} + By^{(k+1)} - b) \end{cases} \quad (31)$$

式中： $\mathcal{L}_\beta$ 为增广拉格朗日矩阵； $\cdot^{(k)}$ 为第 k 次迭代的值； $\|\cdot\|^2$ 为欧几里得范数的平方定邻近矩阵； β 为惩罚函数； x 为 $P_{G,0}(t), \dots, P_{G,i}(t)$ 之和； y 为 $P_{\text{BES},0}(t), \dots, P_{\text{BES},i}(t), P_{\text{tran},0}(t)$ 之和； A 、 B 和 b 为受式(24)和(26)约束的参数值。

5 算例分析

5.1 算例设置

为了验证本文研究的有效性，本文构建了如图 2 所示场景。该场景包括 8 个微网和 1 个直连设备群，直连设备群内包含微型燃气轮机、负荷和电池储能，并且每个设备直接连在公共母线上；微网包含光伏、微型燃气轮机、负荷和电池储能，各个微网内部的设备首先连在微网内部的母线，然后该母线再与公共母线互联；公共母线通过变压器和主电网连接；多微网系统被虚拟分为上下两层，直连设备群为多微网系统上层，微网 1~8 为多微网系统下层。为了体现多微网系统分布式优化仿真的真实性，本文利用文献 [38] 中提供的真实数据，选取其中 9 组光伏出力数据和 8 组负荷需求数据代入本文研究场景进行仿真。为了充分考虑光照强度的变化和负荷需求在空间上的迁移，选取一天 24 h 的光伏出力和负荷需求的数据。此外本文涉及的各种可调节设备参数如表 1 所示。

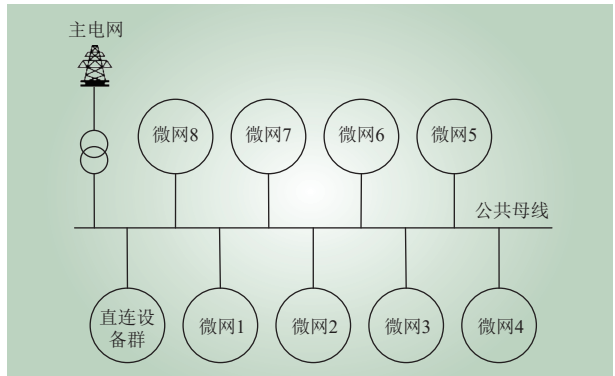


图 2 微网与直连设备群互联的多微网系统
Fig. 2 The multi-microgrid system composed of eight microgrids interconnected with a group of directly connected devices

本文采用的 IGADMM-IPT 的 $\alpha = 0$ ，最大迭代次数为 1000，收敛精度为 10^{-3} ，惩罚因子 $\beta = 10^{-4}$ 。

5.2 多微网系统分布式优化效果展示

基于上述给定的参数和算法，多微网系统下层各微网与上层交互的电量如图 3 所示。通过最大化各微网出力，微网 1 和微网 2 中的富余电量可以满足其他微网的功率缺额，在保证多微网系统功率平衡的前提下，提高可再生能源的消纳率。当仅依靠微网之间的能量交互不能维持供需

表 1 多微网系统模型参数

Table 1 Model parameters of the multi-microgrid system

参数	数值	参数	数值
η_G	0.3	H_G	9.7
$P_{G,\min}/\text{kW}$	0	$P_{G,\max}/\text{kW}$	10
r_1	0.2	r_2	0.005 5
S_{OCref}	0.5	V_{FC}/V	380
$\Delta P_{G,i,\max}/\text{kW}$	500	A	330 330
Q_{FC}/Ah	100	$P_{FC,\max}/\text{kW}$	30
$P_{FC,\min}/\text{kW}$	10	$S_{OCFC,\max}$	0.2
$S_{OCFC,\min}$	0.8	$\omega_1/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	0.001 3
$\omega_2/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	0.16	$\omega_3/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	0
N_{cyc}	2 500	$C/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	700
η_{FC}	0.95	$\xi_0/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	0.41

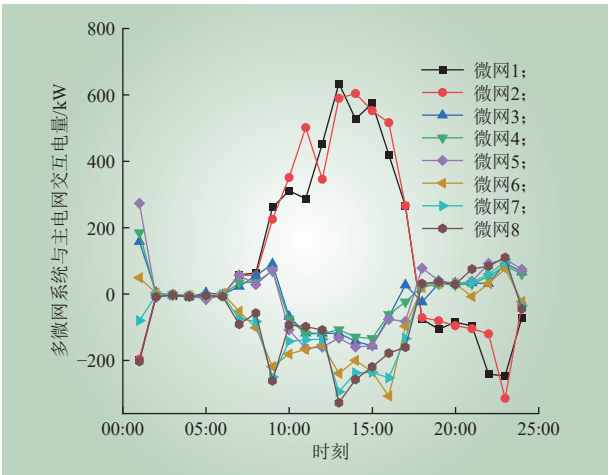


图 3 多微网系统下层与上层交互电量
Fig. 3 The interaction power between the lower and upper layers of the multi-microgrid system

平衡时，上层可以通过调整其内部可调节设备出力来构建新的平衡，上层可调节设备出力如图 4 所示。电池储能具有灵活性高、碳排放低、运行成本小的优点，上层微网的功率调节优先调用电池储能，比如 08:00—09:00 时段。微型燃气轮机频繁启停会降低设备使用寿命，造成额外的成本，因此微型燃气轮机有最低出力限值，大部分时间微型燃气轮机的出力都较为稳定。

5.3 阈值对多微网系统运行不确定性的影响

灵活性是多微网系统经济性和可靠性的综合体现 [18]，其参数包括运行成本、甩负荷比率和可再生能源削减比率。阈值是微网灵活性需求的量化表现，增加微网内可调节设备富余容量可以有

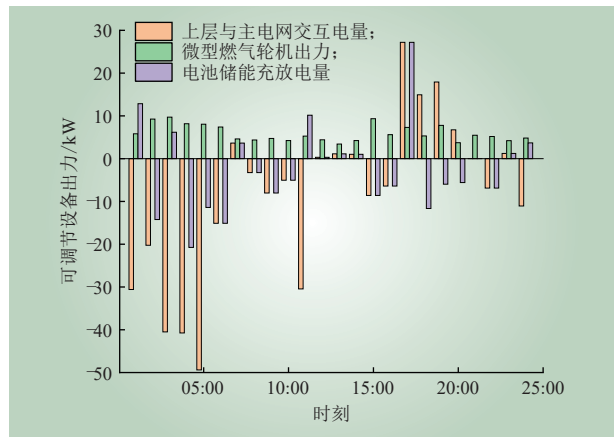


图 4 多微网系统可调节设备出力

Fig. 4 Adjustable equipment output of the multi-microgrid system

效提高阈值，通过提高运行不确定性的允许阈值，系统的优化结果如表 2 所示。

表 2 不同阈值下灵活性参数的变化
Table 2 Changes in flexibility parameters under different thresholds

阈值	运行成本/元	甩负荷比率/%	可再生能源削减比率/%
0.050	312.5	4.21	8.92
0.075	310.1	4.20	8.90
0.100	302.6	4.15	7.89
0.125	298.7	4.11	7.45

随着阈值的增加，甩负荷和可再生能源削减比率都在降低，这表明增加微网可调节设备富余容量有利于微电网的安全稳定运行；同时，多微网系统总的运行成本也随着阈值的增加而降低，这是因为较大的阈值可以增强微网之间的相互作用，提高微网间可再生能源的互补性。

5.4 IGADMM-IPT 与传统优化算法的差别

为了确认本文采用的 IGADMM-IPT 与传统优化算法的差别，以遗传算法（genetic algorithm, GA）和 ADMM 作为集中式优化算法和分布式优化算法代表，分别比较 IGADMM-IPT 与遗传算法和 ADMM 的差别，比较结果如表 3 所示。

表 3 IGADMM-IPT 与 GA 和 ADMM 的优化效果比较
Table 3 Comparison of optimization effects between IGADMM-IPT and GA and ADMM

项目	IGADMM-IPT	ADMM	GA
运行成本/元	312.5	318.6	300.7
求解时间/s	511.25	650.32	3250.6

IGADMM-IPT 与 GA 的运行成本结果相差不大，但 IGADMM-IPT 所需优化时间仅为遗传算法 15.72%。这是因为遗传算法作为集中式优策略，需要计算多微网系统中所有微网的信息，而 IGADMM-IPT 只关注微网本地优化问题，显著降低了计算负担。而对于 ADMM 优化策略，完成一次优化求解所需时间为 650.32 s，而 IGADMM-IPT 仅需 511.25 s 就能够实现迭代收敛，IGADMM-IPT 更适用于本文研究场景。

6 结语

本文提出一种基于非精确广义不定邻近交替方向乘子法的多微网系统分布式协调优化方案。仿真结果表明，该分布式优化策略充分利用了微网间的互补性，本文提出的基于非精确广义不定邻 ADMM 的多微网系统分布式优化所需求解时间比 ADMM 少 21.38%，在最低运行成本差别不大的情况下，本文所提出的非精确广义不定邻近 ADMM 算法优化求解时间仅为集中式算法的 15.72%。

参考文献：

[1] 刘佳,唐早,曾平良,等. 高比例可再生能源接入下与配电系统分层协同的输电系统自适应规划 [J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3105–3115.
LIU Jia, TANG Zao, ZENG Pingliang, *et al.* Adaptive planning of transmission network coordinating distribution networks in a hierarchical manner with high penetration of renewable energy[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3105–3115.

[2] 刘俊峰, 罗燕, 侯媛媛, 等. 考虑广义储能的微电网主动能量管理优化算法研究 [J]. 电网技术, 2023, 47(1): 245–255.
LIU Junfeng, LUO Yan, HOU Yuanyuan, *et al.* Research on optimization algorithm of active microgrid energy management considering generalized energy storage[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 245–255.

[3] ZHANG T J, YUE D, YU L A, *et al.* Joint energy and workload scheduling for fog-assisted multimicrogrid systems: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 164–175.

[4] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555–581.

- LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, *et al.* A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 555–581.
- [5] XU D, ZHOU B, CHAN K W, *et al.* Distributed multienergy coordination of multimicrogrids with biogas-solar-wind renewables[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3254–3266.
- [6] 徐明宇, 郝文波, 王盼宝, 等. 基于动态随机模型的微电网群能量管理方法 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(5): 140–148.
- XU Mingyu, HAO Wenbo, WANG Panbao, *et al.* Energy management method of multi-microgrids based on dynamic stochastic model[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(5): 140–148.
- [7] 希望·阿不都瓦依提, 吕海鹏, 晁勤. 基于非合作博弈的风-光-氢微电网容量优化配置 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(2): 110–118.
- XIWANG·Abudwayiti, LYU Haipeng, CHAO Qin. Optimal capacity configuration of wind-photovoltaic-hydrogen microgrid based on non-cooperative game theory[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(2): 110–118.
- [8] PURAGE M I S L, KRISHNAN A, FOO E Y S, *et al.* Cooperative bidding-based robust optimal energy management of multimicrogrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(9): 5757–5768.
- [9] 徐艳春, 刘海权, 孙思涵, 等. 计及需求响应和共享储能的多微网系统双层优化调度 [J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(6): 18–26.
- XU Yanchun, LIU Haiquan, SUN Sihan, *et al.* Bi-level optimal scheduling of multi-microgrid system considering demand response and shared energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(6): 18–26.
- [10] LU X, XIA S W, SUN G Z, *et al.* Hierarchical distributed control approach for multiple on-site DERs coordinated operation in microgrid[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106864.
- [11] 程奕凌, 张腾飞, 吴巨爱, 等. 基于双层有向图的多微网优化协调运行控制 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(21): 20–29.
- CHENG Yiling, ZHANG Tengfei, WU Juai, *et al.* Optimal coordinated operation control for multi-microgrid based on Bi-level directed graph[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(21): 20–29.
- [12] 陈中, 陈嘉琛, 万玲玲. 基于随机演化动力学的多微网-配电网自组织协同调节策略 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(2): 24–33.
- CHEN Zhong, CHEN Jiachen, WAN Lingling. Self-organized cooperative regulation strategy for multi-microgrid-distribution network based on stochastic evolutionary dynamics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(2): 24–33.
- [13] 华昊辰, 翟家祥, 陈星莺, 等. 基于增强精英保留遗传算法的虚拟多微网系统动态划分及能量局域自治 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(12): 4652–4666.
- HUA Haochen, ZHAI Jiaxiang, CHEN Xingying, *et al.* Dynamical partitioning and local energy autonomy of virtual microgrid groups via strengthen elitist genetic algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(12): 4652–4666.
- [14] KARTHIKEYAN N, PILLAI J R, BAK-JENSEN B, *et al.* Predictive control of flexible resources for demand response in active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 2957–2969.
- [15] 边晓燕, 孙明琦, 许家玉, 等. 计及灵活性储备的含风电多微电网系统分布式协调调控策略 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(8): 47–54, 104.
- BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, XU Jiayu, *et al.* Distributed coordinated dispatch and control strategy of multi-microgrid system with wind power considering flexibility reserve[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(8): 47–54, 104.
- [16] MOHAMMADI A, MEHRTASH M, KARGARIAN A. Diagonal quadratic approximation for decentralized collaborative TSO+DSO optimal power flow[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 2358–2370.
- [17] MAJUMDAR N, SARSTEDT M, KLUB L, *et al.* Linear optimization based distribution grid flexibility aggregation augmented with OLTC operational flexibilities[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 77510–77521.
- [18] 孙文浩, 张乔, 刘志刚, 等. 考虑高海拔山区铁路沿线电网灵活性的分布鲁棒优化方法研究 [J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2485–2497.
- SUN Wenhao, ZHANG Qiao, LIU Zhigang, *et al.* A distributionally robust optimization method considering the flexibility of power grid along high altitude mountain railway[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2485–2497.
- [19] 华昊辰, 辛世禹, 陈星莺, 等. 基于“虚拟碳储存”的需求侧电-碳耦合交易机制 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2131–2144.
- HUA Haochen, XIN Shiyu, CHEN Xinying, *et al.* Demand side electricity-carbon coupling trading mechanism based on "virtual carbon storage"[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2131–2144.
- [20] 张志文, 李华强. 考虑灵活性的孤岛微电网群分层能量管理策

- 略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 97–105.
- ZHANG Zhiwen, LI Huaqiang. A hierarchical energy management strategy for an island microgrid cluster considering flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 97–105.
- [21] MA Y H, ZHANG M Y, YANG H J, *et al.* Decentralized and coordinated scheduling model of interconnected multi-microgrid based on virtual energy storage[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 148: 108990.
- [22] 谢涵铮, 刘友波, 马超, 等. 计及参与成本贡献的用户侧云储能服务及其纳什议价模型[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 9–17.
- XIE H, LIU Y, MA C, *et al.* User-side cloud energy storage service considering participation cost contribution and its Nash bargaining model[J]. Electric Power Automation Equipmen, 2024, 44(2): 9–17.
- [23] 穆云飞, 唐志鹏, 吴志军, 等. 计及虚拟储能的电-水-热综合能源系统日前优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(24): 11–21.
- MU Y, TANG Z, WU Z, *et al.* Optimal day-ahead scheduling method for electricity water hot water integrated energy system considering virtual energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 11–21.
- [24] WANG R, XIAO G X, WANG P. Hybrid centralized-decentralized (HCD) charging control of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 6728–6741.
- [25] 华辰昊, 李宇童, 王同贺, 等. 一种基于混合随机 H2/H ∞ 方法的能源互联网边缘计算系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6875–6885.
- HUA Haochen, LI Yutong, WANG Tonghe, *et al.* A novel stochastic mixed H2/H ∞ control strategy for energy Internet edge computing system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6875–6885.
- [26] 薛溟枫, 毛晓波, 肖浩, 等. 基于联邦学习的综合能源微网群协同优化运行方法[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 164–173.
- XUE Mingfeng, MAO Xiaobo, XIAO Hao, *et al.* Cooperative operation optimization for integrated energy microgrid groups based on federated learning[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 164–173.
- [27] 潘瑞媛, 唐忠, 史晨豪, 等. 基于主从博弈的多主体投资多微网系统优化配置[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 65–73, 127.
- PAN Ruiyuan, TANG Zhong, SHI Chenhao, *et al.* Optimal configuration of multi-microgrid system with multi-agent joint investment based on stackelberg game[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 65–73, 127.
- [28] 李虹, 韩雨萌. 基于 LSTM-CGAN 的多微网数据驱动分布式鲁棒协同优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 133–148.
- LI Hong, HAN Yumeng. Data-driven distributionally robust collaborative optimization operation strategy for a multi-microgrid based on LSTM-CGAN[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 133–148.
- [29] 张冲标, 钱辰雯, 俞红燕, 等. 基于 ADMM 的多场景县域多微电网交互运行策略[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 9–18.
- ZHANG Chongbiao, QIAN Chenwen, YU Hongyan, *et al.* Interactive operation strategy for multi-scenario county-level multi-microgrid based on ADMM[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 9–18.
- [30] 杜佳男, 韩肖清, 李廷钧, 等. 考虑电价不确定性和博弈欺诈行为的多微网电能合作运行优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4217–4230.
- DU Jianan, HAN Xiaoqing, LI Tingjun, *et al.* Optimization strategy of multi-microgrid electric energy cooperative operation considering electricity price uncertainty and game cheating behaviors[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4217–4230.
- [31] ZENDEGAN S, FERRARA A, JAKUBEK S, *et al.* Predictive battery state of charge reference generation using basic route information for optimal energy management of heavy-duty fuel cell vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(12): 12517–12528.
- [32] 张祥宇, 舒一楠, 付媛. 基于虚拟储能的直流微电网源荷储多时间尺度能量优化与分区协调控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 6011–6024.
- ZHANG Xiangyu, SHU Yinan, FU Yuan. Multi-time-scale energy optimization and zone coordinated control of DC microgrid source-load-storage based on virtual energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6011–6024.
- [33] LEE H, KIM N W, LEE J G, *et al.* Error distribution-based anomaly score for forecasting-based anomaly detection of PV systems[C]// 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju Island, Korea. IEEE, 2021.
- [34] BROWELL J, FASIOLO M. Probabilistic forecasting of regional net-load with conditional extremes and gridded NWP[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5011–5019.
- [35] KIM J H, LEE J, JOO S K. Conditional value-at-risk-based method for evaluating the economic risk of superconducting fault current limiter installation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1–4.
- [36] DENG X C, WANG F, LIN X K, *et al.* Distributed energy management of home-vehicle Nexus with stationary battery energy storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 168: 112837.
- [37] 宋瑞, 王依冉, 吴中明. 非精确广义不定邻近交替方向乘子法的收

敛性分析[J/OL]. 运筹学学报: 1-17[2023-11-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1732.O1.20230608.1046.034.html>.

SONG Rui, WANG Yiran, WU Zhongming. convergence analysis of the inexact generalized alternating direction method of multipliers with indefinite proximal term[J/OL]. Operations Research Transactions: 1-17[2023-07-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1732.O1.20230608.1046.034.html>.

[38] Pecan Street Inc. Dataport (data_california) [DB/OL]. (2020-12-31) [2023-02-10]. <https://dataport.cloud/>.

作者简介:

黄堃(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail:

huangkun1@spepri.sgcc.com.cn;

付明(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事新能源接入与运行控制、综合能源服务的研究,

E-mail: fuming@sgepri.com.cn.

(责任编辑 李博)

Distributed Coordination Optimization for Economic Operation of the Multi-Microgrid System Based on Improved Linearization ADMM

HUANG Kun^{1,2}, FU Ming¹, ZHAI Jiaxiang³, HUA Haochen³

(1. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. School of Electronic Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 2110096, China; 3. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Traditional centralized optimization strategies for multi microgrid systems have the problem of long computational time, while the distributed optimization strategies can effectively reduce the solving time. However, the efficiency of distributed optimization algorithms represented by the alternating direction method of multipliers (ADMM) depends on the difficulty of solving the Lagrangian augmented function of the objective function, making it difficult to apply to complex multi microgrid systems. Therefore, this article proposes a distributed coordination optimization scheme for multi-microgrid systems based on the inexact generalized alternating direction method of multipliers with defined proximate terms (IGADMM-IPT). Firstly, a hierarchical optimization architecture for the multi-microgrid system and a dynamic model for each adjustable device are constructed. Then, based on the difference between renewable energy output and load demand, and the adjustable equipment output thresholds, the shared power generation and energy storage capacity of each microgrid are determined. And then, based on the lowest operating cost of the multi-microgrid system, a global shared objective function is constructed, and the optimization problem is iteratively solved using IGADMM-IPT. Finally, simulation is conducted in a scenario where eight microgrids and a group of directly connected devices are interconnected through a common bus. The results show that using IGADMM-IPT to obtain the lowest operating cost optimization solution for the multi-microgrid system within one day requires 21.38% less time than ADMM.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (Research and Demonstration of Microgrid Groups Collaborative Optimization and Regulation Technology for High Proportion New Energy Consumption, No.4000-202219058A-1-1-ZN).

Keywords: multi-microgrid system; renewable energy; distributed optimization