

考虑多维联动碳减排策略的多微网配电系统 分层分布式调度

吕超贤¹, 邢润发¹, 梁睿¹, 王颖², 柴园园³, 瞿凯平¹

(1. 中国矿业大学电气工程学院, 江苏省 徐州市 221116;

2. 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室(东南大学), 江苏省 南京市 210096;

3. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津市 北辰区 300401)

Hierarchical Distributed Scheduling of Multi-microgrid Distribution System Considering Multi-dimensional Linked Carbon Emission Reduction Strategies

LYU Chaoxian¹, XING Runfa¹, LIANG Rui¹, WANG Ying², CHAI Yuanyuan³, QU Kaiping¹

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China;

2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex System of Engineering (Southeast University), Ministry of Education, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

3. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Beichen District, Tianjin 300401, China)

ABSTRACT: To achieve low-carbon operation and protect privacy when a multi-microgrid (MMG) interacts with the distribution network (DN), this paper proposes a hierarchical distributed dispatch model for the multi-microgrid distribution system (MMDS) that considers multidimensional, linked carbon-emission reduction strategies. Firstly, the microgrid (MG) implements the carbon capture system (CCS) and its coupling equipment to establish a CCS-power to gas (P2G) cycle carbon reduction model under the conversion mechanism of energy flow and carbon flow. Furthermore, the load energy-use curve is optimized by an incentive demand response (DR) mechanism to enhance the energy efficiency of CCS, thereby facilitating low-carbon operation. Secondly, the carbon emission flow (CEF) theory is introduced at the DN level. It utilizes the node carbon potential as a signal for reducing carbon emission, which facilitates the equal sharing of carbon responsibility to quantify the interactive power and enhances the carbon reduction benefits of synergistic and complementary relationships between MMG and DN. Finally, under the optimal operation mechanism of carbon quota and carbon trading, a low-carbon operation strategy with a

multi-dimensional linkage mode is formed through the above diversified measures. A hierarchical distributed approach based on analytical target cascading (ATC) is employed to decouple interaction variables and enable a distributed solution for each operating entity. The numerical results show that the proposed strategy can significantly improve carbon economic performance, and the distributed algorithm can deliver an accurate and effective solution with limited information. Furthermore, it can be effectively applied to large-scale, complex systems and typical day-to-day cases across different seasons, with a certain degree of general applicability.

KEY WORDS: multi-microgrid distribution system; carbon capture; carbon emission flow theory; multi-dimensional linked carbon emission reduction; analytical target cascading

摘要: 面对电力系统低碳化运行需求及多微网配电系统协同互动隐私问题,提出一种考虑多维联动碳减排策略的多微网配电系统分层分布式调度模型。首先,在微网内部引入碳捕集及其耦合设备,分析设备能流-碳流耦合机理,构建碳捕集-电转气协同的微网循环减碳模式;同时在微网用能端构建激励型需求响应机制,引导微网负荷侧调节用电时序,以提升碳捕集捕碳能效。其次,在配电网层引入碳排放流理论,通过节点碳势量化交互功率碳排放,便于碳责均摊,提升多微网与配电网间的协同互补减碳效益。最后,在碳配额及碳交易的优化运行机制下,通过上述多元化措施形成多维联动模式下的低碳运行策略,并基于目标级联理论的分层分布式方法对配电网与多微网耦合模型的交互变量进行解耦,实现各运营主体的分布式求解。仿真结果表明,所提调度方法可显著提升低碳经济运行水平,分布式调度策略可通过交互有

基金项目: 国家自然科学基金项目(52307154); 江苏省自然科学基金项目(BK20231076); 中央高校基本科研业务费专项资金(MCCSE2023A02)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52307154); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20231076); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (MCCSE2023A02).

限信息实现微网-配电网协同的精确快速求解,并能在大规模复杂系统和不同季节典型日算例中有效应用,具有一定泛用性。

关键词: 多微网配电系统;碳捕集;碳排放流;多维联动碳减排;目标级联法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0768

0 引言

微网(microgrid, MG)作为一种能够有效管理多种异质源-荷资源的自治系统,广泛集成分布于配电网(distribution network, DN)中。而多微网(multi-microgrid, MMG)作为微网集群协作运行,可充分发挥其多能互补、交互响应及节能减排优势,提升DN的经济低碳水平^[1]。

国内外学者已针对能源领域的碳减排开展诸多研究。碳捕集系统(carbon capture system, CCS)和电转气(power to gas, P2G)间的协同运行,可捕集火电机组运行产生的CO₂进行封存再利用,降低系统碳排放,逐渐成为研究热点^[2]。为促进微网系统节能减排,将CCS应用到微电网系统中,可经过膜分离法实现对燃气轮机碳排的回收再利用,兼顾环境和经济效益^[3]。而P2G耦合冷热电联产微电网,可提高微网系统的风光消纳能力,在促进微网系统清洁及高效用能等方面提供了新的视角^[4]。文献[5]通过在电-热-气多能微电网系统应用碳捕集-电转气耦合设备,捕获再利用热电联产机组产生的CO₂,提升了系统低碳运行水平,实现了可再生能源的充分消纳。文献[6]进一步考虑负荷侧灵活调节潜力,提出了计及需求响应与CCS灵活运行的低碳调度策略,充分发挥了源荷协同减碳优势。上述文献对CCS在园区能源/微电网系统中的应用及减碳模式开展了一定研究,从不同角度证明了CCS-P2G的减碳效果。但上述研究多针对异质资源间耦合降碳效益,缺乏激励运营商自主调节促进节能减排的手段,因此有学者在系统调度层面引入碳配额交易机制以进一步促进系统低碳经济运行^[7]。而仅从源侧探究碳减排效益不能理清碳排放责任,无法实现碳责均摊。从“碳视角”出发,通过引入碳排放流理论将源侧碳排放责任归结到负荷侧,可进一步挖掘减碳潜力,提升系统清洁化运行水平^[8]。文献[9]基于碳流理论,建立了考虑用户侧碳排放配额约束的最优潮流模型,满足了配电网用户用电碳排放需求。文献[10]提出一种引导用户主动响应并降低系统碳排放的电力系统碳减排新机制—低碳需求响应机制,并验证了其减碳效果。上述文献从不同层面分析了碳流理论在电力系统减碳效益中发挥的

作用,但大多研究的是配电网侧,鲜有文献考虑碳流理论下配电网-微电网协同运行下的碳减排潜力。

随着微网集群的涌现,发挥各微网-配电网间能源互补协调能力进而提高能源利用率,可有效提升系统低碳经济效益^[11-12]。MMG作为可整合多种源-荷资源的综合载体,可为DN提供辅助服务、参与市场调节和协调能源交互^[13]。文献[14]将MMG以柔性可调度负荷的形式接入DN中,辅助DN负荷侧实现削峰填谷。文献[15]综合考虑经济性与环保性指标,利用博弈理论促进了MG与DN之间的低碳经济运行。

可见,多微网和配电网的协作运行是实现低碳经济运行的有效手段。含多微网的配电网简称多微网配电系统(multi-microgrid distribution system, MMDS),其中配电网和多微网常属于不同运营主体,传统集中式优化调度策略无法满足不同运营主体隐私保护需求。交替方向乘子法(alternating direction method of multiplier, ADMM)^[16]、一致性算法(consensus algorithm, CA)^[17]及目标级联法(analytical target cascading, ATC)^[18]等分布式优化算法可实现多主体的分层分布式求解。ATC凭借其收敛精度高、求解时间短、参数易于选择等优点在MMDS的分布式求解方面得到了广泛应用。文献[19]通过将MMG与DN的优化问题分解成日前调度主问题和实时检测子问题,利用ATC实现了分散调度的中断管理。文献[20]基于改进ATC方法,解决了输-配电网的分布式储能优化问题。文献[21]通过构建含MMG的DN双层模型,引入ATC算法对各方利益主体进行协调,实现了MMDS的分布式求解。上述文献已对配电网和多微网的分散求解做了一定研究,但碳流理论和碳循环下的多微网配电系统分散协同互补低碳运行模式鲜有研究。如何保证配电网可靠运行并发挥碳流理论引导下的多主体间协同互补减碳优势和微网需求响应下的碳捕集循环减碳能效,实现有限信息交互下的多微网和配电网分布式协同低碳调度值得深入探索。

综上,为实现隐私保护下多微网和配电网协同低碳运行,本文提出一种考虑多维联动碳减排策略的MMDS分层分布式调度方法。主要工作如下:

1) 在微网内部引入CCS-P2G耦合设备,对其能流-碳流关系进行详细建模,构建微网碳循环利用模式;同时,结合激励型需求响应策略,调节微网负荷用能曲线,提升微网内部碳循环设备的减碳能效,促进源荷协同减碳。

2) 基于“碳”视角构建虚拟碳排放流模型,

将配电网源侧碳排放责任归结至负荷侧, 通过节点碳势量化用能碳排放水平, 进而引导微网用能行为, 优化配电网-微网资源交互聚合, 提升协同降碳效益。

3) 在碳配额市场交易模式下结合微网“源”侧碳捕集减碳模式、配网“网”侧碳排放流理论和微网“荷”侧激励型需求响应机制等不同环节的多元化减碳措施, 构建多维联动减碳运行策略, 提高MMDS的经济运行效益与灵活减碳能力。

4) 考虑不同主体间隐私保护需求, 构建MMDS分层分布式低碳调度模型; 基于ATC算法对耦合分层模型的交互变量解耦并进行迭代求解, 实现各运营主体内部平衡和MMDS全局意义下的协同优化。

1 物理-信息多层协同的MMDS架构

1.1 含CCS-P2G的微网结构及循环减碳模式

含CCS-P2G的微网结构如图1所示, 系统以燃气轮机(gas turbine, GT)作为主要供能设备, 并配备一定容量的风机(wind turbines, WT)、光伏(photovoltaic, PV)及储能(battery storage, BS)设备辅助系统实现电负荷平衡, 同时可与配电网进行功率交互以促进协同运行。为实现碳流循环进而减碳, 系统配置一定容量的CCS及其耦合设备。

基于上述架构形成的含CCS的微网循环减碳模式为: CCS捕集燃气轮机发电所产生的 CO_2 , 可存储至碳存储设备(carbon storage, CS)中, 与P2G

设备协同消纳弃风弃光并生成天然气提供给燃气机组。通过上述CCS-P2G的协同运行机理, 形成一种基于CCS的循环减碳模式, 实现了碳的“动态利用”和风光能源的充分消纳。

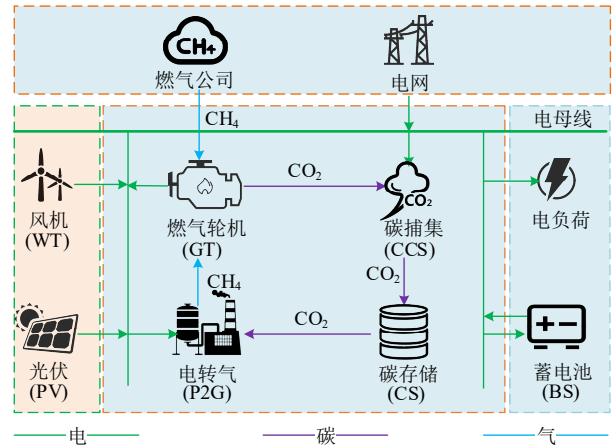


图1 含碳捕集-电转气的微网结构

Fig. 1 CCS-P2G-equipped structure of microgrid

1.2 物理-信息多层协同的MMDS结构

基于物理-信息多层协同的多微网配电系统结构如图2所示。物理层: 不同数量的风光机组和多个微网多节点分散接入配电网, 通过电能交互实现协同互补运行。信息层: 配电网和多微网通常隶属于不同运营主体, 仅能通过有限信息传递各自功率交互数据和节点碳势情况; 此时, 为保护各独立系统内部隐私, 需要设计合理的分布式协同策略以提升整体安全运行效果。

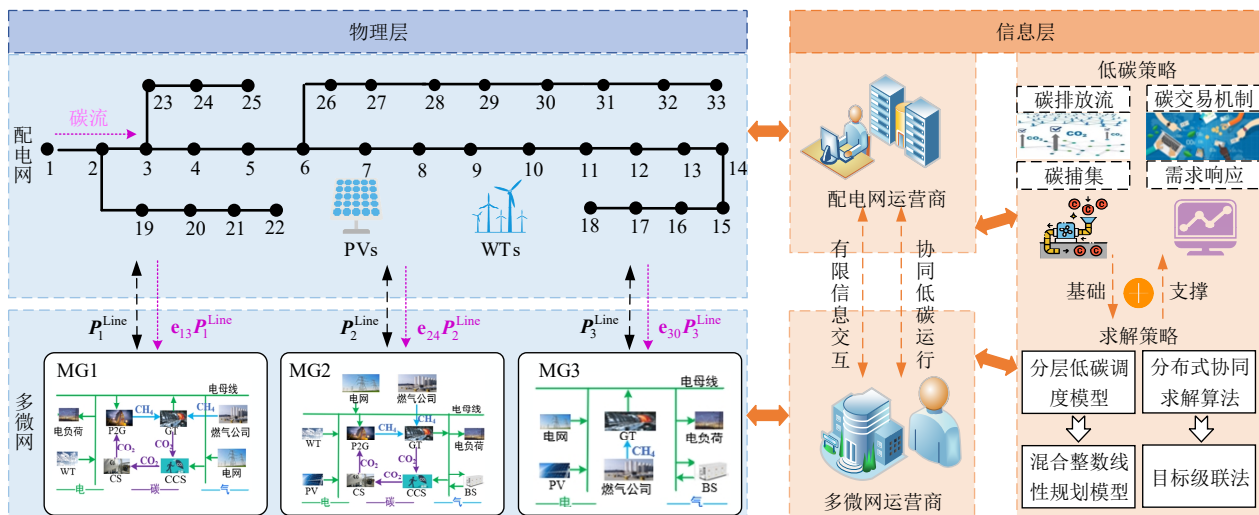


图2 物理-信息多层协同的多微网配电系统结构

Fig. 2 Multi-microgrid distribution system structure with physical-informational multi-layer collaboration

此外, 多微网配电系统能量生产-传输-消费各环节均有一定的碳排放, 而作为末端消费的微电网聚合多种灵活资源具有较强减碳调节能力, 是实现系统节能减排的关键。面向双碳目标的碳排放市场交易机制(carbon trading mechanism, CTM)下, 设

置适用于多微网配电系统的物理-信息多层协调运行架构, 可充分发挥物理架构基础, 策略辅助支撑与信息统筹优化间的耦合互补能效, 合理改善配电网和微网内部能流分布, 实现MMDS经济效益和环境效益双赢。

2 考虑多维联动碳减排策略的 MMDS 灵活低碳运行模型

在实际碳配额分配与碳市场政策引导下,以 MMDS 区域降碳目标为出发点,从源-网-荷多角度多环节的减碳方法入手,构建 MMDS 多维联动减碳运行策略。首先,引入 CCS-P2G 对微网内部燃气机组产生的 CO₂ 进行捕获再利用,促进“源”端低碳经济化产能;其次,在“网”端,通过碳流理论量化各节点用能碳排放水平,提升微网-配网交互协同减碳效益;最后,在微网“荷”端考虑激励型需求响应机制,调节用能曲线,充分消纳新能源并提升碳捕集捕碳能效。通过上述不同环节下的多元化措施,行成多维联动模式下的低碳运行策略,促进 MMDS 产能经济化,用能高效化,排放清洁化。

2.1 考虑碳排放流理论的配电网运行模型

2.1.1 碳排放流理论

碳排放流理论能够根据已知的系统潮流分布,确认系统中任一节点的碳势(即每个节点单位用电量产生的碳排放量^[22]),实现将配电网源侧碳排放责任公平合理地分摊到配电网负荷侧,其示意图如图 3 所示。因此,本文通过各节点碳势来计量配电网负荷侧碳排放,而配电网向微电网进行功率输送时,所产生的电能碳排放量也可通过微网接入配电网节点的碳势进行量化以进一步约束微网内部发电行为,进而减少碳排放;而微电网向配电网输送功率时可等效成发电机组加入至节点碳势计算模型中,进而影响配电网整体碳排放。

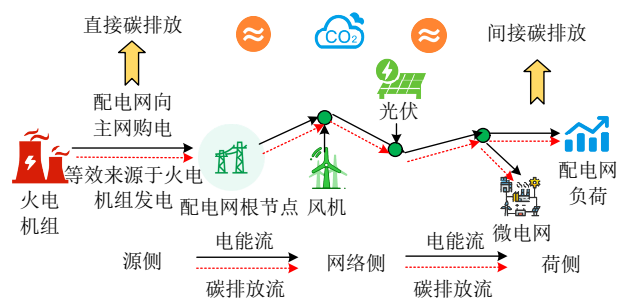


图3 负荷侧碳排放责任分摊

Fig. 3 Load-side carbon responsibility apportionment

节点碳势的数学表达式为

$$e_i = (\sum_{s \in B^{\text{Sup}}} P_{Bs} e_{Bs} + P_{Gi} e_{Gi}) / (\sum_{s \in B^{\text{Sup}}} P_{Bs} + P_{Gi}) \quad (1)$$

式中： e_i 为节点 i 的碳势；对任意节点 i 定义其上游支路的集合为 B^{Sup} ；下标 s 为节点 i 的第 s 条上游支路，且该支路的末端节点为节点 i ； P_{Bs} 为节点 i 上游支路 s 的有功功率； e_{Bs} 为节点 i 上游支路 s 的碳排放强度； P_{Gi} 为节点 i 接入发电机的有功功率，这里的发电机组包括接入配电网的风光机组及微电

网向配电网输送功率时的等效“虚拟发电机组”； e_{Gi} 为节点 i 的发电机组碳排放强度。

基于系统潮流计算结果,得到配电网各节点各个时刻的节点碳势矩阵表达式^[23]为

$$E_t = (P_{N,t} - P_{B,t}^T)^{-1} P_{G,t}^T E_{G,t} \quad (2)$$

式中： E_t 为 t 时段各节点碳势矩阵； t 为时刻标识； $P_{N,t}$ 为 t 时段节点有功通量矩阵； $P_{B,t}$ 为 t 时段线路潮流分布矩阵； $P_{G,t}$ 为 t 时段发电机组出力矩阵； $E_{G,t}$ 为 t 时段发电机组碳排放因子矩阵。

2.1.2 配电网运行模型

基于配电网辐射状结构构建支路潮流模型,并利用二阶锥松弛^[24]方法对非线性约束进行转化,具体模型及转化过程见附录 A 式(A1)–(A8)。

2.1.3 约束条件

主要包括配电网系统安全约束、节点净注入功率约束及机组出力上下限等约束,具体约束条件见附录 A 式(A9)–(A13)。

2.2 考虑 CCS-P2G 循环减碳模式的多微网运行模型

2.2.1 设备模型

主要包括燃气轮机、碳捕集、碳存储、电转气及储能设备,具体模型见附录 A 式(A14)–(A23)。

2.2.2 柔性需求响应模型

本文在微网层考虑负荷侧需求响应模型,其中柔性可调节负荷主要包含可转移负荷、可削减负荷和可中断负荷,具体模型见附录 A 式(A24)–(A26)。

2.2.3 约束条件

主要包括微网 GT 出力约束、风光出力约束、CCS-P2G 运行约束、BS 容量约束及电能平衡约束等,具体约束条件见附录 A 式(A27)–(A33)。

3 考虑碳交易奖惩机制的 MMDS 分层分布式调度方法

3.1 考虑碳交易机制的 MMDS 分层调度模型

3.1.1 MMDS 碳交易机制

基于碳配额市场交易的手段对 MMDS 中的 CO₂ 排放总量进行控制,以促进系统节能减排,具体过程如附录图 B1 所示。

当前,全国和地方碳市场主要以能耗水平作为控排企业配额分配的依据,并根据历史用电水平、行业平均水平等确定排放基准^[25]。为充分调动负荷侧节能减排积极性,本文针对传统碳交易计算模型进行改进。通过节点碳势理论计算配电网系统总体碳排放量,并根据配电网和多微网的负荷水平合理分配碳配额。如此,配电网负荷侧资源可直

接参与碳市场交易,配-微网交互用能产生的碳排放也更加清晰,有利于提升 MMDS 协同互补低碳运行效益。具体计算模型如下所示:

1) 碳排放配额计算。

根据配电网和各微网负荷用能水平均匀分配碳配额。

$$M_{DN}^Q = M_{MMDS}^{Q,all} \sum_{t=1}^T P_{load,t}^{DN} / \sum_{t=1}^T (P_{load,t}^{DN} + \sum_{m=1}^M P_{m,t}^{L,MG}) \quad (3)$$

$$M_m^Q = M_{MMDS}^{Q,all} \sum_{t=1}^T P_{m,t}^{L,MG} / \sum_{t=1}^T (P_{load,t}^{DN} + \sum_{m=1}^M P_{m,t}^{L,MG}) \quad (4)$$

式中: M_{DN}^Q 为配电网碳配额; $M_{MMDS}^{Q,all}$ 为 MMDS 区域总碳配额; $P_{load,t}^{DN}$ 为配电网负荷用能情况; $P_{m,t}^{L,MG}$ 为微网 m 负荷用能情况; M_m^Q 为微网 m 获得的碳配额; T 为调度周期; m 为微网标识; M 为微网个数。

2) 碳排放量计算。

由于配电网采用碳流理论将源侧碳排放责任归结到负荷侧,因此对应于配电网层所产生的实际碳排放为

$$M_{DN}^{CO_2} = \sum_{t=1}^T E_t P_{load,t}^{DN} \quad (5)$$

式中: $M_{DN}^{CO_2}$ 为配电网负荷侧产生的碳排放量; E_t 为 t 时段各负荷节点碳势矩阵。

对应于微网的实际碳排放量是指微网系统产生的 CO_2 减去 CCS 捕获的 CO_2 , 计算公式如下:

$$M_m^{Air} = \sum_{t=1}^T (M_{m,t}^{GT} + E_{m,t} P_{m,t}^{Line} - M_{m,t}^{CCS}) \quad (6)$$

式中: M_m^{Air} 为微网 m 排放到大气中的实际 CO_2 净排放量; $M_{m,t}^{GT}$ 为 t 时段微网 m 中 GT 排放的 CO_2 量; $E_{m,t}$ 为微网 m 的节点碳势; $P_{m,t}^{Line}$ 为微网与配网间的交互功率,由于碳势表示用能碳排放情况,此时交互功率仅计算为正的时候,即配电网向微电网输送功率; $M_{m,t}^{CCS}$ 为 t 时段微网 m 中 CCS 的捕碳量。

3) 碳交易模型。

各主体根据自身实际碳排放量在碳市场进行配额交易,对于超出与不足的部分则通过当日的碳交易价格获得一定的收益或支付一定的成本。因此,碳交易成本可表示为

$$C_{Trade,DN} = c_{Trade} (M_{DN}^{CO_2} - M_{DN}^Q) \quad (7)$$

$$C_{Trade,MMG} = \sum_{m=1}^M c_{Trade} (M_m^{Air} - M_m^Q) \quad (8)$$

式中: $C_{Trade,DN}$ 、 $C_{Trade,MMG}$ 分别为配电网和多微网的碳交易成本; c_{Trade} 为碳交易价格。

3.1.2 配电网目标函数

配电网系统以低碳运行成本最低为目标,包括

购电成本、网损惩罚、机组运维成本及碳交易成本。

$$\min C_{DN} = \min(C_P + C_{Loss} + C_{OM,DN} + C_{Trade,DN}) \quad (9)$$

$$C_P = \sum_{t=1}^T c_{main,t} P_{main,t} \quad (10)$$

$$C_{Loss} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Omega(i)} c_{Loss} I_{ij,t}^2 r_{ij} \quad (11)$$

$$C_{OM,DN} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D (\lambda_{WT} P_{d,t}^{WT,DN} + \lambda_{PV} P_{d,t}^{PV,DN}) \quad (12)$$

$$C_{Trade,DN} = c_{Trade} (M_{DN}^{CO_2} - M_{DN}^Q) \quad (13)$$

式中: C_{DN} 为配电网总运行成本; C_P 为配电网向主网购电成本; C_{Loss} 为网损惩罚; $C_{OM,DN}$ 为配电网机组运维成本; $C_{Trade,DN}$ 为配电网碳交易成本; $c_{main,t}$ 为主网购电电价; $P_{main,t}$ 为根节点注入的有功功率; $\Omega(i)$ 表示以 i 为首节点的支路末端节点集合; N 为节点个数; c_{Loss} 为网损成本系数; $I_{ij,t}^2$ 为 t 时段支路电流 ij 的平方; r_{ij} 为支路 ij 的电阻值; D 为风光机组数量; λ_{WT} 、 λ_{PV} 为风光机组的运维成本系数; $P_{d,t}^{WT,DN}$ 、 $P_{d,t}^{PV,DN}$ 为 t 时段风光机组 d 输出的有功功率。

3.1.3 多微网目标函数

多微网系统以运行成本和综合碳成本之和最小为目标,其中:运行成本包括系统购气成本、储能设备运维成本、机组运行成本、需求响应负荷补偿成本;综合碳成本包括碳流循环下的碳交易成本及储碳成本。

$$\min C_{MMG} = \min(C_{Gas} + C_{BS} + C_{OM,MMG} + C_{DR,MMG} + C_{Trade,MMG} + C_{CS}) \quad (14)$$

$$C_{Gas} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M c_{Gas} (V_{m,t}^{GT} - V_{m,t}^{P2G}) \quad (15)$$

$$C_{BS} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \lambda_{BS} (\eta_{Ch} P_{m,t}^{Ch} + \eta_{Dis} P_{m,t}^{Dis}) \quad (16)$$

$$C_{OM,MMG} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (\lambda_{WT} P_{m,t}^{WT,MG} + \lambda_{PV} P_{m,t}^{PV,MG} + \lambda_{GT} P_{m,t}^{GT} + \lambda_{P2G} P_{m,t}^{P2G} + \lambda_{CCS} P_{m,t}^{CCS}) \quad (17)$$

$$C_{DR,MMG} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (c_{cut} \Delta P_{m,t}^{cut} + c_{trans} P_{m,t}^{trans_in} + c_{inter} \Delta P_{m,t}^{inter}) \quad (18)$$

$$C_{Trade,MMG} = \sum_{m=1}^M c_{Trade} (M_m^{Air} - M_m^Q) \quad (19)$$

$$C_{CS} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M c_{CS} M_{m,t}^{CS} \quad (20)$$

式中: C_{MMG} 为多微网总成本; C_{Gas} 为多微网系统购气成本; C_{BS} 为多微网储能充放电成本; $C_{OM,MMG}$ 为多微网设备运维成本; $C_{DR,MMG}$ 为多微网需求响

应负荷补偿成本; $C_{\text{Trade,MMG}}$ 为多微网碳交易成本; C_{CS} 为储碳成本; c_{Gas} 为天然气价格; $V_{m,t}^{\text{GT}}$ 为 t 时段微网 m 中燃气轮机消耗的燃气量; $V_{m,t}^{\text{P2G}}$ 为 t 时段微网 m 中 P2G 合成的燃气量; λ_{BS} 为储能设备单位运维成本; η_{Ch} 、 η_{Dis} 分别为储能设备的充、放电效率; $P_{m,t}^{\text{Ch}}$ 、 $P_{m,t}^{\text{Dis}}$ 分别为 t 时段微网 m 中储能设备的充、放电功率; $P_{m,t}^{\text{WT,MG}}$ 、 $P_{m,t}^{\text{PV,MG}}$ 为 t 时段微网 m 中风光机组输出的有功功率; λ_{GT} 为燃气轮机的运行成本系数; $P_{m,t}^{\text{GT}}$ 为 t 时段微网 m 中燃气轮机的输出功率; λ_{CCS} 、 λ_{P2G} 为 CCS 和 P2G 的运行成本系数; $P_{m,t}^{\text{CCS}}$ 为 CCS 总能耗; $P_{m,t}^{\text{P2G}}$ 为 t 时段微网 m 中 P2G 消耗的总功率; c_{cut} 、 c_{trans} 和 c_{inter} 分别为可削减、可转移及可中断负荷补偿成本系数; $\Delta P_{m,t}^{\text{cut}}$ 为 t 时段微网 m 削减的负荷功率; $P_{m,t}^{\text{trans,in}}$ 为 t 时段微网 m 可转移负荷移入功率; $\Delta P_{m,t}^{\text{inter}}$ 为 t 时段微网 m 中断的负荷功率; c_{CS} 为单位储碳成本; $M_{m,t}^{\text{CS}}$ 为 t 时段微网 m 中碳存储设备的储碳量。

3.2 基于 ATC 的 MMDS 分层分布式求解策略

本文所构建模型为基于节点碳势的多维联动减碳调度模型。其中, 未确定潮流的情况下, 在配电网目标函数中考虑负荷侧碳交易成本进行最优潮流的计算将产生大量非线性约束, 目前的商业求解器无法直接求解该类模型, 不利于碳流引导下配-微网间低碳高效交互机制的实现; 而分布式调度方法可以将配网运行模型和微网运行模型解耦, 通过在每次迭代过程中计算配网潮流结果, 进而根据矩阵计算节点碳势结果, 实现节点碳势下的需求响应, 规避了统一求解模式中节点碳势计算非线性约束处理问题。因此, 本文兼顾不同主体隐私保护需求, 基于分布式调度思想, 通过 ATC 实现多维联动减碳策略下的分布式低碳调度。

ATC 是一种解决分层设计的分布式优化方法, 具有多层系统并行优化、参数易于选择和收敛速度快等优点^[26], 详细收敛过程见文献[27-28]。应用在本文的 ATC 模型可同样实现收敛, 具体证明见附录 B。

3.2.1 模型解耦

本文采用 ATC 算法对配电网和多微网间的耦合变量进行解耦, 并设置式(21)的一致性约束, 可实现有限信息交互下的 MMDS 分层分布式求解。

$$\begin{cases} P_{m,t}^{\text{DN}'} = P_{m,t}^{\text{Line}} = P_{m,t}^{\text{MG}'} \\ -P_{\text{max}}^{\text{Line}} \leq P_{m,t}^{\text{Line}} \leq P_{\text{max}}^{\text{Line}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{Line}}$ 为微网与配电网交互功率的最大值; $P_m^{\text{DN}'}$ 为配电网层的期望交互功率值; $P_m^{\text{MG}'}$ 为微网层

的期望交互功率值。

则解耦后的配电网目标函数可更新为

$$\min \left\{ C_{\text{DN}} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \alpha_{m,t} (P_{m,t}^{\text{DN},k} - P_{m,t}^{\text{MG},k-1}) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \beta_{m,t} (P_{m,t}^{\text{DN},k} - P_{m,t}^{\text{MG},k-1})^2 \right\} \quad (22)$$

式中: $P_{m,t}^{\text{DN},k}$ 为第 k 次迭代后的配电网期望交互功率值; $P_{m,t}^{\text{MG},k-1}$ 为第 $k-1$ 次迭代后的微网期望交互功率值; $\alpha_{m,t}$ 、 $\beta_{m,t}$ 分别为拉格朗日罚函数一次项和二次项乘子。

同理, 多微网目标函数可更新为

$$\min \left\{ C_{\text{MMG}} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \alpha_{m,t} (P_{m,t}^{\text{MG},k} - P_{m,t}^{\text{DN},k-1}) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \beta_{m,t} (P_{m,t}^{\text{MG},k} - P_{m,t}^{\text{DN},k-1})^2 \right\} \quad (23)$$

因此, 在基于 ATC 的 MMDS 分层分布式调度模型中, 上层配电网模型由式(22)及相应约束条件构成, 下层多微网模型由式(23)及相应约束条件构成。两者独立求解, 交叠优化直到满足 ATC 算法的收敛条件。

3.2.2 模型求解

本文基于微网“源”端碳捕集、配网“网”端碳排放流理论及微网“荷”需求响应机制构建了多维联动减碳运行策略, 其中碳排放流理论下的节点碳势是基于配电网系统潮流结果进行计算的, 而不同节点碳势的计算结果也会进一步影响微网-配网交互用能行为, 通过集中式统一求解方式实现碳流引导下的高效精确求解较为困难。面对上述问题, 兼顾不同运营主体隐私保护及考虑碳势的低碳运行需求, 本文基于 ATC 理论, 融合配网碳流引导下的交互用能策略和微网需求响应下的 CCS 循环减碳模式、构建多维联动减碳运行策略下的分层分布式迭代求解架构。在传统配电网与多微网协同调度基础上对交互信息内容进行改进, 通过交互电能信息和节点碳势信息对耦合变量解耦迭代求解以实现多维联动减碳运行策略下的 MMDS 协同互补运行。基于 ATC 的 MMDS 分层分布式求解步骤见附录 B, 求解流程如附录图 B2 所示。

4 算例分析

本文采用接入 3 个微电网的 IEEE 33 节点配电网系统进行算例分析, 调度周期为 24h, 时间间隔为 1h。执行案例仿真的软件为配置了 YALMIP 工具箱的 MATLAB_R2021a, 调用 Gurobi 9.5 求解器进行求解。所使用的仿真平台处理器为 Intel(R)

Core(TM) i5-7300 HQ，内存为 16GB，操作系统为 64 位 Windows 10。

含 3 个微网的 IEEE 33 节点系统结构如附录图 B3 所示，配电网系统参数见文献[29]。节点 7、27 接入光伏机组，容量分别为 500kVA 和 200kVA；节点 10、20 接入风机机组，容量分别为 500kVA 和 400kVA。分布式电源及配网用电负荷日运行预测曲线如附录图 C1 所示。

系统中共有 3 个微网，分别接于节点 13、24 和 30。各微网设备配置及相关运行参数见附录表 C1-C4，负荷及风光出力预测情况见附录图 C2。MMDS 负荷侧各类型需求响应配置见附录表 C5，其中，微网 1 中的可转移负荷和可中断负荷占微网 1 总负荷的比例均为 27.78%，类似地，微网 2 的可转移负荷和可削减负荷占比均为 23.81%，微网 3 的可削减负荷占比为 20%。可转移阈值系数最大值、切除系数允许最大值及可削减负荷比例上限均为 0.5，调度补偿成本为可转移负荷 0.1 元/kWh、可削减负荷及可中断负荷 0.4 元/(kW·h)。ATC 算法参数见附录表 C6。

4.1 MMDS 灵活低碳调度结果

1) 配电网碳流结果分析。

图 4 为根据电力系统潮流理论构建的虚拟碳流模型计算所得的各节点各时刻碳势。根据节点碳势计算模型可知，可再生能源接入会产生“零碳”效应，各节点碳势较源端均有不同程度的降低。同时，量化各节点用能碳排放水平，可引导低碳目标下微网用能行为，优化微网-配网间交互功率。

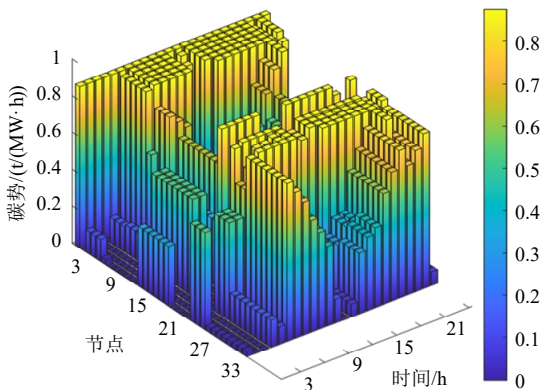


图 4 配电网各节点碳势
Fig. 4 Node carbon intensity of DN

2) 微网内部电能优化分析。

以含 CCS 和 P2G 的 MG2 为例分析微网内部电能优化调度结果，见附录图 B4。可以看出，在 00:00—24:00 时段，燃气轮机作为常规能源在一定的功率范围内进行供电，保证系统基本电力供应。而在 02:00—03:00 及 05:00、07:00、12:00 时段，风光出

力较足，储能设备进行功率存储；在 10:00 和 13:00—14:00 时段进行功率输出，以满足部分负荷需求。在 14:00—23:00 时段，由于需求响应策略影响，负荷的时域分布发生改变；此时段负荷功率降低，碳捕集设备可消耗富余风光能量提升碳捕集捕碳能效。在 24:00—05:00 时段，P2G 设备通过消耗富余风电能量以合成部分天然气，减少系统购气量。同时，在调度周期内，当微网自身电力需求不能被满足时，通过与配电网进行不同程度的电能交互来实现供需平衡。

3) MMDS 低碳效益分析。

为验证本文所提低碳调度模型的优越性，设定表 1 的 4 个场景进行分析。

表 1 不同场景下的运行方案 Table 1 Operation cases under different scenarios			
场景	CCS-P2G	激励型需求响应	碳排放流理论
1	×	×	×
2	√	×	×
3	√	√	×
4	√	√	√

注：√表示该场景包含相应模型，×则相反。

4 种场景优化结果如表 2 所示。相较于场景 1，场景 2 引入 CCS-P2G 模型后，天然气成本增加了 5.25%，总成本增加了 13.96%。这是由于引进 CCS-P2G 设备后，运行维护成本增加，源端供能功率增加。但 CCS-P2G 耦合机组能够消耗富余能量以发挥其捕碳再利用的降碳效果，使 MMDS 中风光消纳率提高了 14.88%，碳排放量降低了 18.02%，碳交易成本降低了 24.21%，提升了低碳运行效益。可见基于 CCS-P2G 协同运行的低碳调度模型，能在保证一定经济运行情况下，促进系统节能减排。

表 2 4 种场景优化结果对比 Table 2 Optimization result comparison of four scenarios						
场景	主网 购电/元	天然气 成本/元	碳排放/吨	碳交易 成本/元	风光 消纳率/%	系统 总成本/元
1	6923.4	17045.9	39.4	3525.6	84.7	31292.1
2	7334.5	17940.9	32.3	2672.1	97.3	35660.6
3	7218.8	14616.3	29.2	2309.2	97.7	33879.5
4	8605.8	12815.4	28.9	2278.2	97.7	33017.4

相较于场景 2，场景 3 引入激励型需求响应模型后，柔性负荷通过调节用能曲线以增加 CCS-P2G 的运行功率，捕获二氧化碳并合成天然气，使得天然气成本降低了 18.53%，碳排放量进一步降低 3.1t，同比降低 9.59%。图 5 为场景 3 下的微网 2 负荷端需求响应优化结果。从图中可以看出，可转移负荷将 14:00—16:00 时段的高峰期负荷转移至 24:00—12:00 时段的负荷低谷期以调节用能曲线，而可削减负荷在 05:00—24:00 时段进行不同程度的削减以

减少源端供能。通过上述不同时段柔性负荷调节,使得 P2G 在 24:00—05:00 时段消耗富余的风电能量生成天然气,提高了新能源消纳率。而 CCS 通过负荷需求响应策略的影响,在 14:00—23:00 时段的消耗功率有所提升,增加了其捕碳能效。

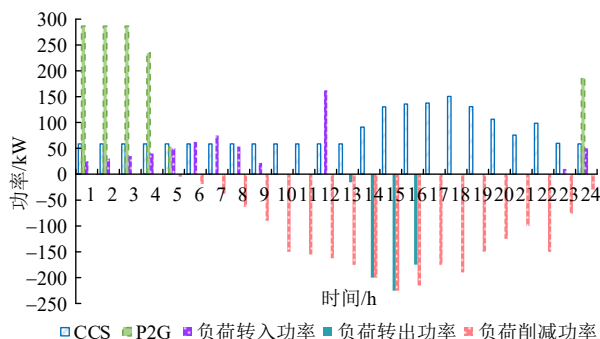


图5 场景3-微网2需求响应结果

Fig. 5 Demand response results of MG2 in scenario 3

因此,在调度周期内,充分发挥柔性需求响应策略的优越性,可改善源端供能水平,调节荷端用能水平,最大化促进源-荷协同减碳。诚然,通过不断调整不同微网内部柔性负荷占比可能会获得更优解;但需要结合实际运行需求与微网负荷差异进行适当调整,以保证 MMDS 获得清洁低碳、经济高效的用能方案。

相较于场景3,场景4引入碳排放流理论量化节点用能碳排放后,各微网通过节点与配电网间的交互效果有所改善。以 DN-MG1 为例进行分析,对比结果如图6所示,其中正值代表 DN 向 MG1 输送电能,负值代表 MG1 向 DN 输送电能。

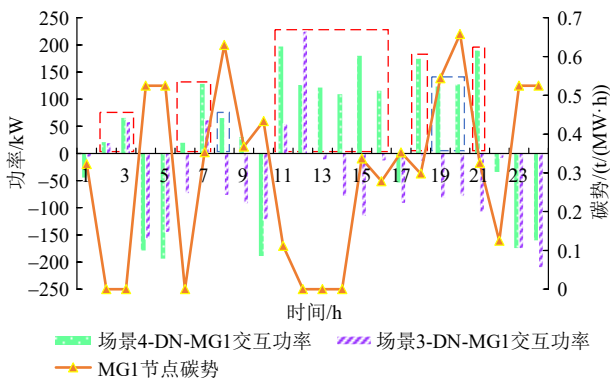


图6 不同场景下的交互功率

Fig. 6 Interaction power under different scenarios

由图6可知,场景3中未考虑不同时刻的碳势影响,交互功率的优化结果与碳势分布情况不统一,在满足多微网和配电网协同运行的前提下不能最大化促进低碳运行。而场景4由于考虑了碳排放流理论,量化了各节点各时刻用能碳排放情况,在 02:00—03:00、06:00—07:00、11:00—16:00 及 18:00、21:00 等节点碳势较低的时段,相对场景3, MG1

消耗更多电能,有助于提升协同交互低碳效果;同时,相较于场景4中其他时段,08:00、19:00—20:00 时段节点碳势较高, DN 向 MG1 输送功率有所降低,在满足协同互补运行需求的前提下提升了碳减排效益。

由于节点碳势仅影响用能端碳排放,场景4中微网向配电网输送功率产生的碳排放已通过碳排放流理论计算至配电网碳排放中。而场景3中仅考虑单一碳排放因子表示微网向配电网输送功率产生的碳排放,所呈现的规律大多满足协同互补运行需求,无法深度挖掘协同交互减碳效益。因此,不同场景下各微网均与配电网进行不同程度的电能交互,以改善微网和配网内部能流,满足双方系统部分负荷需求。但场景4考虑碳流理论后能量交互产生的碳排放较少,更利于实现多微网配电系统环保经济运行。同时结合表2可知,相较于场景3,场景4中多微网与配电网在不同时刻功率交互值的改善影响了 MMDS 内部源端供能占比,使得 MMDS 的天然气成本进一步降低了 12.32%,碳排放量进一步减少 0.3t,总运行成本降低 2.54%,有效提升了 MMDS 协同互补经济减碳效益。

相较于场景1,场景4通过引入 CCS-P2G 模型、激励型需求响应和碳排放流理论,使得 MMDS 天然气成本降低了 24.82%, CO₂ 排放量降低了 26.65%,碳交易成本降低了 35.38%,总成本仅增加 5.51%,说明本文所提低碳调度模型能兼顾一定经济性下实现环保效益最优,验证了本文所提低碳调度模型的优越性。

4.2 基于 ATC 的分布式算法性能分析

1) 联络线交互功率收敛情况分析。

由于不同时刻联络线功率数值不同,为了更好的分析联络线交互功率的收敛情况,本文选取 DN-MG2 在 8 时刻、12 时刻和 22 时刻的联络线交互功率数值来分析 ATC 算法的性能,如附录图 B5 所示。从图中可以看出,初始优化得到的交互功率值并不相同,但随着迭代次数的增加及罚函数乘子的更新,期望交互功率差值逐渐降低,最终均趋于一致。可见基于 ATC 的分布式优化方法,能有效实现各运营主体的内部平衡和 MMDS 全局意义下的协同优化。

2) 算法收敛情况分析。

由图7可以看出:随着迭代次数的增加及罚函数乘子的更新,配电网与多微网协调边界交互功率不断靠近,直至第3次迭代趋于平缓。当迭代至第19次时,收敛判据值低于1%,满足收敛精度要求,证明了 ATC 算法的有效性。

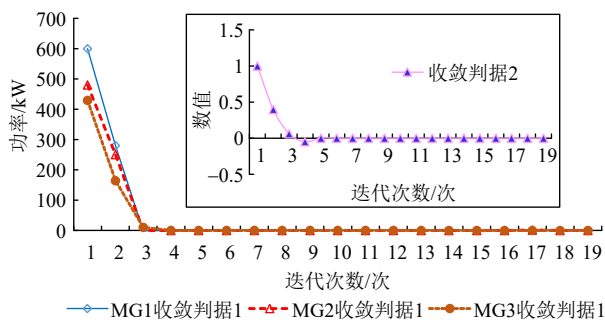


图7 收敛判据迭代图

Fig. 7 Convergence criterion iteration diagram

3) 算法性能对比分析。

从表3可以看出, ADMM和ATC算法求解得到的MMDS总成本仅差0.12%,但ADMM算法在迭代时间和迭代次数方面均比ATC算法多了10倍,可见ATC算法在分层分布式求解方面具备更好的收敛性能。

表3 不同算法收敛性能对比

Table 3 Convergence performance comparison of different algorithms

算法	迭代时间/s	迭代次数/次	MMDS总成本/元
ATC	238	19	33017
ADMM	2480	211	33058

4.3 模型通用性验证

为全面评估本文所提方法的泛化能力,进一步通过不同源荷特征的夏冬典型日算例和大规模节点的电网算例^[30]进行分析验证,结果见附录D。

5 结论

针对同一配电区域内灵活低碳化运行需求及多微网配电系统协同减碳运行中的隐私保护问题,将具备低碳特性的碳捕集-电转气耦合设备引入微网系统进行建模,并通过在配网侧引入碳排放流理论和在微网层采取激励型需求响应机制等不同环节的多元化措施,构建了考虑多维联动碳减排策略的多微网配电系统分层分布式调度模型。通过算例分析得到以下结论:

1) 以MMDS区域降碳目标为出发点,基于源-网-荷多角度多环节下的多维联动减碳策略,可有效促进能源消纳与柔性资源的优化整合,发挥CCS-P2G机组的动态再利用效果,降低MMDS天然气成本24.82%;通过需求响应下的CCS机组捕碳潜力和节点碳势引导下的交互减碳行为,降低MMDS中CO₂排放量26.65%,碳交易成本35.38%,进而实现多微网和配电网协同低碳经济运行。

2) 基于ATC的多微网和配电网分层分布式求解策略通过交换有限信息实现多微网与配电网的

分布式协同低碳运行,具有较好收敛效果。同时,在大规模系统或不同季节典型日算例中也能呈现较好的收敛性能,模型通用性较强。

后续研究将考虑微网间、微网与配网间电能及碳配额交易问题,实现碳-电市场机制下多利益主体均衡博弈;同时,计及不同主体控制尺度的差异,探索多时间尺度下微网和配网低碳交互方法。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 刘迎澍, 陈曦, 李斌, 等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3804-3820.
LIU Yingshu, CHEN Xi, LI Bin, et al. State of art of the key technologies of multiple microgrids system[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3804-3820(in Chinese).
- [2] 骆钊, 罗蒙顺, 沈鑫, 等. 基于碳捕集-电转气的矿区综合能源系统协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 22-30.
LUO Zhao, LUO Mengshun, SHEN Xin, et al. Collaborative optimal scheduling of coal mine integrated energy system based on carbon capture and power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 22-30(in Chinese).
- [3] 袁铁江, 曹继雷. 计及风电-负荷不确定性的风氢低碳能源系统容量优化配置[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2037-2044.
YUAN Tiejiang, CAO Jilei. Capacity optimization allocation of wind hydrogen low-carbon energy system considering wind power-load uncertainty[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2037-2044(in Chinese).
- [4] FENG Fei, DU Xin, SI Qiang, et al. Operation optimization of distributed multi-energy multi-microgrid considering system robustness[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2023, 41(3): 1085-1106.
- [5] 吴锦领, 楼平, 管敏渊, 等. 基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2711-2721.
WU Jinling, LOU Ping, GUAN Minyuan, et al. Operation optimization strategy of multi-microgrids energy sharing based on asymmetric Nash bargaining[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2711-2721(in Chinese).
- [6] 崔杨, 邓贵波, 赵钰婷, 等. 考虑源荷低碳特性互补的含风电电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4799-4815.
CUI Yang, DENG Guibo, ZHAO Yuting, et al. Economic dispatch of power system with wind power considering the complementarity of low-carbon characteristics of source side and load side[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4799-4815(in Chinese).
- [7] SUN Qingkai, WANG Xiaojun, LIU Zhao, et al. Multi-agent energy management optimization for integrated energy systems under the energy and carbon co-trading market[J]. Applied Energy, 2022, 324: 119646.
- [8] 张玉敏, 孙鹏凯, 吉兴全, 等. 考虑扩展碳排放流的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3174-3183.
ZHANG Yumin, SUN Pengkai, JI Xingquan, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with augmented carbon emission flow[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3174-3183(in Chinese).
- [9] 黄铭浩, 唐坤杰, 董树锋, 等. 基于碳流理论考虑用户侧碳排放配额的最优潮流[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2703-2712.
HUANG Minghao, TANG Kunjie, DONG Shufeng, et al. Optimal

- power flow considering user-side carbon emission allowances based on carbon flow theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2703-2712(in Chinese).
- [10] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2830-2841.
LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2841(in Chinese).
- [11] YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR M, PAASO A, et al. Distribution network-constrained optimization of peer-to-peer transactive energy trading among multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1033-1047.
- [12] 陈倩, 王维庆, 王海云. 计及需求响应和混合博弈含多微网主动配电网协调优化[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 99-109.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Coordinated optimization of active distribution network with multiple microgrids considering demand response and mixed game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 99-109(in Chinese).
- [13] VILLANUEVA-ROSARIO J A, SANTOS-GARCÍA F, AYBAR-MEJÍA M E, et al. Coordinated ancillary services, market participation and communication of multi-microgrids: a review[J]. Applied Energy, 2022, 308: 118332.
- [14] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049(in Chinese).
- [15] KARIMI H, BAHMANI R, JADID S, et al. Dynamic transactive energy in multi-microgrid systems considering independence performance index: a multi-objective optimization framework[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106563.
- [16] 王开艳, 梁岩, 贾嵘, 等. 不确定环境下基于纳什谈判的含掺氢燃气综合能源多微网两阶段优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3141-3152.
WANG Kaiyan, LIANG Yan, JIA Rong, et al. Two-stage optimal scheduling of Nash negotiation-based integrated energy multi-microgrids with hydrogen-doped gas under uncertain environment[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3141-3152(in Chinese).
- [17] 刘鑫蕊, 张明超, 王睿, 等. 基于一致性算法的城市微网群分层协同控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 65-73.
LIU Xinrui, ZHANG Mingchao, WANG Rui, et al. Hierarchical collaborative control of urban microgrid cluster based on consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 65-73(in Chinese).
- [18] ALOWAIFEER M, ALKHRAJAH M, MELIOPOULOS A P S, et al. Grid services optimization from multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 8-19.
- [19] FESAGANDIS H S, JALALI M, ZARE K, et al. Decentralized strategy for real-time outages management and scheduling of networked microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107271.
- [20] 蔡福霖, 胡泽春, 曹敏健, 等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 23-32.
CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 23-32(in Chinese).
- [21] 周丹, 孙可, 张全明, 等. 含多个综合能源联供型微网的配电网日前鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4473-4485.
ZHOU Dan, SUN Ke, ZHANG Quanming, et al. Day-ahead robust dispatch of distribution network with multiple integrated energy system-based micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4473-4485(in Chinese).
- [22] 王常乐, 刘海涛, 窦真兰, 等. 基于园区 IES 购电方案优化的低碳运行模型[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1441-1454.
WANG Changle, LIU Haitao, DOU Zhenlan, et al. Low carbon operation model based on the optimization of power purchase in park IES[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1441-1454(in Chinese).
- [23] 周特, 薛云飞, 季节, 等. 考虑电力间接碳排放不确定性的电-冷-热综合能源系统两阶段鲁棒优化方法[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 50-60.
ZHOU Te, XUE Yunfei, JI Jie, et al. Two-stage robust optimization for electricity-cooling-heat integrated energy system considering uncertainty of indirect carbon emissions of electricity[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 50-60(in Chinese).
- [24] TZIOVANI L, HADJIDEMETRIOU L, KOLIOS P, et al. Energy management and control of photovoltaic and storage systems in active distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 1956-1968.
- [25] 尚楠, 陈政, 冷媛. 电碳市场背景下典型环境权益产品衔接互认机制及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2558-2577.
SHANG Nan, CHEN Zheng, LENG Yuan. Mutual recognition mechanism and key technologies of typical environmental interest products in power and carbon markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2558-2577(in Chinese).
- [26] QI Chen, WANG Keyou, FU Yong, et al. A decentralized optimal operation of AC/DC hybrid distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6095-6105.
- [27] MICHELENA N, PARK H, PAPALAMBROS P Y. Convergence properties of analytical target cascading[J]. AIAA Journal, 2003, 41(5): 897-905.
- [28] TOSSERAMS S, ETMAN L F P, PAPALAMBROS P Y, et al. An augmented lagrangian relaxation for analytical target cascading using the alternating direction method of multipliers[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2006, 31(3): 176-189.
- [29] 赵毅, 陈雨婷, 孙文瑶. 多微网配电系统区间调度方法与市场交易策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 47-56.
ZHAO Yi, CHEN Yuting, SUN Wenyao. Region dispatch method and market trading strategy for multi-microgrid distribution system[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 47-56(in Chinese).
- [30] 宋关羽. 面向多运行场景的智能配电软开关运行与规划方法[D]. 天津: 天津大学, 2017.



吕超贤

在线出版日期: 2024-11-28。

收稿日期: 2024-05-07。

作者简介:

吕超贤(1989), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为智能配电网、综合能源系统运行与规划, E-mail: chaoxianlv@163.com;

邢润发(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为多微网与配电网系统优化调度, E-mail: xingrunfa@cumt.edu.cn。

(责任编辑 赵梓含)

附录 A

1. 配电网运行模型

基于配电网辐射状结构的支路潮流模型，其方程形式如下所示：

$$P_{jk,t} = P_{ij,t} - I_{ij,t}^2 r_{ij} - P_{j,t} \quad (A1)$$

$$Q_{jk,t} = Q_{ij,t} - I_{ij,t}^2 x_{ij} - Q_{j,t} \quad (A2)$$

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 \quad (A3)$$

$$I_{ij,t}^2 = (P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2) / U_{i,t}^2 \quad (A4)$$

式中：\$P_{jk,t}\$、\$Q_{jk,t}\$ 为 \$t\$ 时段支路 \$jk\$ 的首端有功无功功率；\$P_{ij,t}\$、\$Q_{ij,t}\$ 为 \$t\$ 时段支路 \$ij\$ 的首端有功无功功率；\$x_{ij}\$ 为支路 \$ij\$ 的电抗值；\$U_{i,t}\$、\$U_{j,t}\$ 为 \$t\$ 时段节点 \$i\$、\$j\$ 的电压幅值；\$P_{j,t}\$、\$Q_{j,t}\$ 为 \$t\$ 时段节点 \$j\$ 的净注入有功和无功功率。

针对上述非线性约束，令 \$\bar{I}_{ij,t} = I_{ij,t}^2\$ 和 \$\bar{U}_{i,t} = U_{i,t}^2\$，对式(6)进行二阶锥松弛^[24]，则模型更新为

$$P_{jk,t} = P_{ij,t} - \bar{I}_{ij,t} r_{ij} - P_{j,t} \quad (A5)$$

$$Q_{jk,t} = Q_{ij,t} - \bar{I}_{ij,t} x_{ij} - Q_{j,t} \quad (A6)$$

$$\bar{U}_{j,t} = \bar{U}_{i,t} - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \bar{I}_{ij,t} \quad (A7)$$

$$\| [2P_{ij,t} \ 2Q_{ij,t} \ \bar{I}_{ij,t} - \bar{U}_{i,t}]^T \|_2 \leq \bar{I}_{ij,t} + \bar{U}_{i,t} \quad (A8)$$

如此，上述约束可变为混合整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 模型，并利用求解器进行求解。

2. 配电网约束条件

1) 系统安全约束

$$U_{\min}^2 \leq U_{i,t}^2 \leq U_{\max}^2 \quad (A9)$$

$$0 \leq I_{ij,t}^2 \leq I_{\max}^2 \quad (A10)$$

式中：\$U_{\min}\$、\$U_{\max}\$ 分别为节点电压幅值下限、上限；\$I_{\max}\$ 为各支路电流幅值的最大值。

2) 机组出力上下限约束

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{WT,DN}} \leq P_{j,t}^{\text{WT,DN}} \leq P_{\max}^{\text{WT,DN}} \\ Q_{\min}^{\text{WT,DN}} \leq Q_{j,t}^{\text{WT,DN}} \leq Q_{\max}^{\text{WT,DN}} \\ (P_{j,t}^{\text{WT,DN}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{WT,DN}})^2 \leq (S_{j,t}^{\text{WT,DN}})^2 \end{cases} \quad (A11)$$

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{PV,DN}} \leq P_{j,t}^{\text{PV,DN}} \leq P_{\max}^{\text{PV,DN}} \\ Q_{\min}^{\text{PV,DN}} \leq Q_{j,t}^{\text{PV,DN}} \leq Q_{\max}^{\text{PV,DN}} \\ (P_{j,t}^{\text{PV,DN}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{PV,DN}})^2 \leq (S_{j,t}^{\text{PV,DN}})^2 \end{cases} \quad (A12)$$

式中：\$P_{\min}^{\text{WT,DN}}\$、\$P_{\max}^{\text{WT,DN}}\$、\$Q_{\min}^{\text{WT,DN}}\$、\$Q_{\max}^{\text{WT,DN}}\$ 为风机输出的有功和无功功率最小、最大值；\$P_{\min}^{\text{PV,DN}}\$、\$P_{\max}^{\text{PV,DN}}\$、\$Q_{\min}^{\text{PV,DN}}\$、\$Q_{\max}^{\text{PV,DN}}\$ 为光伏输出的有功无功功率最小、最大值；\$S_{j,t}^{\text{WT,DN}}\$、\$S_{j,t}^{\text{PV,DN}}\$ 为节点 \$j\$ 风、光机组容量。

3) 节点净注入功率约束

$$\begin{cases} P_{j,t} = P_{j,t}^{\text{WT,DN}} + P_{j,t}^{\text{PV,DN}} + P_{j,t}^{\text{Line}} - P_{j,t}^{\text{L,DN}} \\ Q_{j,t} = Q_{j,t}^{\text{WT,DN}} + Q_{j,t}^{\text{PV,DN}} - Q_{j,t}^{\text{L,DN}} \end{cases} \quad (A13)$$

式中：\$P_{j,t}^{\text{L,DN}}\$、\$Q_{j,t}^{\text{L,DN}}\$ 为 \$t\$ 时段节点 \$j\$ 的有功和无功负荷；\$P_{j,t}^{\text{Line}}\$ 为 \$t\$ 时段节点 \$j\$ 连接的微网与配电网间交互功率；\$P_{j,t}^{\text{WT,DN}}\$、\$P_{j,t}^{\text{PV,DN}}\$、\$Q_{j,t}^{\text{WT,DN}}\$、\$Q_{j,t}^{\text{PV,DN}}\$ 为 \$t\$ 时段节点 \$j\$ 风光机组输出的有功和无功功率。

3. 多微网运行模型

1) 燃气轮机(GT)

$$P_{m,t}^{\text{GT}} = V_{m,t}^{\text{GT}} \eta_{\text{GT}} L_{\text{gas}} \quad (A14)$$

式中：\$L_{\text{gas}}\$ 为消耗单位天然气产生的功率，一般取 9.7kWh/m³；\$\eta_{\text{GT}}\$ 为 GT 的发电效率。

2) 碳捕集系统(CCS)

本文采用燃烧后碳捕集技术，它作用于发电机组的下游，通过化学吸收或膜分离等方法，将捕集到的二氧化碳压缩并进行存储处理^[3]。

其中碳捕集系统运行能耗包含两部分，一部分是设备运行所需的固定能耗，与设备运行状态无关，可视作常数；另一部分为捕集 CO₂ 所需的运行能耗，与捕集的 CO₂ 量有关。

$$M_{m,t}^{\text{GT}} = v_1 Q_{\text{gas}} V_{m,t}^{\text{GT}} = v_1 P_{m,t}^{\text{GT}} / \eta_{\text{GT}} \quad (A15)$$

$$M_{m,t}^{\text{CCS}} = \mu_{\text{CCS}} M_{m,t}^{\text{GT}} \quad (A16)$$

$$P_{m,t}^{\text{CCS}} = P_{m,t}^{\text{CCS,E}} + P_{m,t}^{\text{CCS,C}} \quad (A17)$$

$$P_{m,t}^{\text{CCS,C}} = \sigma_{\text{CCS}} M_{m,t}^{\text{CCS}} \quad (A18)$$

式中：\$v_1\$ 为 GT 碳排放强度；\$Q_{\text{gas}}\$ 为天然气热值；\$\mu_{\text{CCS}}\$ 为碳捕获效率；\$P_{m,t}^{\text{CCS,E}}\$ 为 CCS 固定能耗；\$P_{m,t}^{\text{CCS,C}}\$ 为 CCS 运行能耗；\$\sigma_{\text{CCS}}\$ 为 CCS 处理单位 CO₂ 所需能耗。

3) 碳存储设备(CS)

$$M_{m,t}^{\text{CS}} = M_{m,t-1}^{\text{CS}} + (1 - \lambda_{\text{CS}}) M_{m,t}^{\text{CCS}} - M_{m,t}^{\text{P2G,CS}} \quad (A19)$$

式中：\$\lambda_{\text{CS}}\$ 为 CS 的储碳损耗系数；\$M_{m,t}^{\text{P2G,CS}}\$ 为 \$t\$ 时段微网 \$m\$ 中 CS 的 CO₂ 输出量。

4) 电转气(P2G)

$$V_{m,t}^{\text{P2G}} = z_{\text{cr}} \eta_{\text{P2G}} P_{m,t}^{\text{P2G}} / Q_{\text{gas}} \quad (A20)$$

$$M_{m,t}^{\text{P2G}} = \sigma_{\text{CO}_2} \eta_{\text{P2G}} P_{m,t}^{\text{P2G}} \quad (A21)$$

$$M_{m,t}^{\text{P2G}} = M_{m,t}^{\text{P2G,CS}} \quad (A22)$$

式中：\$z_{\text{cr}}\$ 为单位电能所能转化的热能；\$\eta_{\text{P2G}}\$ 为 P2G 工作效率；\$M_{m,t}^{\text{P2G}}\$ 为 P2G 消耗的 CO₂ 量；\$\sigma_{\text{CO}_2}\$ 为生成单位功率天然气所需 CO₂ 量。

5) 储能设备(BS)

$$S_{m,t}^{\text{BS}} = (1 - u) S_{m,t-1}^{\text{BS}} + (\eta_{\text{Ch}} P_{m,t}^{\text{Ch}} - P_{m,t}^{\text{Dis}} / \eta_{\text{Dis}}) \Delta t \quad (A23)$$

式中: $S_{m,t}^{BS}$ 为 t 时段微网 m 中 BS 存储的能量; u 为 BS 向环境散能损失或自损耗的能量系数。

6) 可转移负荷需求响应模型

$$\begin{cases} P_{m,t}^{trans_b} = P_{m,t}^{trans0} + P_{m,t}^{trans_in} - P_{m,t}^{trans_out} \\ P_{m,t}^{trans_in} = \mu_{m,t}^{trans} P_{m,t}^{trans0} b_{m,t}^{trans_in} \\ P_{m,t}^{trans_out} = \mu_{m,t}^{trans} P_{m,t}^{trans0} b_{m,t}^{trans_out} \\ 0 \leq \mu_{m,t}^{trans} \leq \mu^{trans,max} \\ b_{m,t}^{trans_in} + b_{m,t}^{trans_out} \leq 1 \\ \sum_{t \in \Phi^{trans}} P_{m,t}^{trans_in} = \sum_{t \in \Phi^{trans}} P_{m,t}^{trans_out} \end{cases} \quad (A24)$$

式中: $P_{m,t}^{trans0}$ 为 t 时段微网 m 初始可转移负荷功率; $P_{m,t}^{trans_b}$ 为 t 时段微网 m 转移后负荷功率; $P_{m,t}^{trans_out}$ 为 t 时段微网 m 可转移负荷移出功率; $b_{m,t}^{trans_in}$ 、 $b_{m,t}^{trans_out}$ 分别为 t 时段微网 m 可转移负荷移入和移出状态, 为 0-1 变量; $\mu_{m,t}^{trans}$ 为可转移负荷功率阈值系数, $\mu^{trans,max}$ 为对应最大值; Φ^{trans} 为可转移工作时段集合。

7) 可削减负荷需求响应模型

$$\begin{cases} P_{m,t}^{cut_b} = P_{m,t}^{cut0} - \Delta P_{m,t}^{cut} \\ 0 \leq \Delta P_{m,t}^{cut} \leq \varepsilon_{m,t}^{cut} P_{m,t}^{cut0,max} \end{cases} \quad (A25)$$

式中: $P_{m,t}^{cut0}$ 为 t 时段微网 m 初始可削减负荷功率; $P_{m,t}^{cut_b}$ 为 t 时段微网 m 削减后负荷功率; $\varepsilon_{m,t}^{cut}$ 为 0-1 变量, $\varepsilon_{m,t}^{cut}=1$ 表示负荷在 t 时段发生削减; $P_{m,t}^{cut0,max}$ 为可削减负荷量上限。

8) 可中断负荷需求响应模型

$$\begin{cases} P_{m,t}^{inter_b} = P_{m,t}^{inter0} - \Delta P_{m,t}^{inter} \\ \Delta P_{m,t}^{inter} = \mu_{m,t}^{inter} P_{m,t}^{inter0} \\ 0 \leq \mu_{m,t}^{inter} \leq \mu^{inter,max} \end{cases} \quad (A26)$$

式中: $P_{m,t}^{inter0}$ 为 t 时段微网 m 初始可中断负荷功率; $P_{m,t}^{inter_b}$ 为 t 时段微网 m 中断后负荷功率; $\mu_{m,t}^{inter}$ 为可中断负荷切除系数; $\mu^{inter,max}$ 为切除系数允许最大值。

4. 微网约束条件

1) GT 出力约束

$$P_{min}^{GT} \leq P_{m,t}^{GT} \leq P_{max}^{GT} \quad (A27)$$

$$R_{down}^{GT} \Delta t \leq P_{m,t}^{GT} - P_{m,t-1}^{GT} \leq R_{up}^{GT} \Delta t \quad (A28)$$

式中: P_{max}^{GT} 、 P_{min}^{GT} 为 GT 出力上下限; R_{up}^{GT} 、 R_{down}^{GT} 为 GT 爬坡功率上下限; Δt 为相邻时间间隔。

2) CCS 和 P2G 运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{m,t}^{CCS} \leq P_{max}^{CCS} \\ 0 \leq P_{m,t}^{P2G} \leq P_{max}^{P2G} \end{cases} \quad (A29)$$

式中: P_{max}^{CCS} 、 P_{max}^{P2G} 为 CCS 和 P2G 的能耗最大值。

3) CS 约束

$$\begin{cases} M_{min}^{CS} \leq M_{m,t}^{CS} \leq M_{max}^{CS} \\ M_{min}^{CS} \leq M_{m,t}^{CCS} \leq M_{max}^{CS} \\ M_{min}^{CS} \leq M_{m,t}^{P2G,CS} \leq M_{max}^{CS} \end{cases} \quad (A30)$$

式中: M_{min}^{CS} 、 M_{max}^{CS} 为 CS 的最小、最大储碳量。

4) BS 运行约束

$$\begin{cases} \eta_{min}^{SOC} S_{rated}^{BS} \leq S_{m,t}^{BS} \leq \eta_{max}^{SOC} S_{rated}^{BS} \\ 0 \leq P_{m,t}^{Ch} \leq B_{m,t}^{Ch} P_{max}^{BS} \\ 0 \leq P_{m,t}^{Dis} \leq B_{m,t}^{Dis} P_{max}^{BS} \\ B_{m,t}^{Ch} + B_{m,t}^{Dis} \leq 1 \end{cases} \quad (A31)$$

式中: S_{rated}^{BS} 为 BS 总容量; η_{min}^{SOC} 、 η_{max}^{SOC} 分别为 BS 荷电状态上下限; P_{max}^{BS} 为 BS 充放电功率上限; $B_{m,t}^{Ch}$ 、 $B_{m,t}^{Dis}$ 分别为 t 时段微网 m 中 BS 充、放电状态的 0-1 变量。

5) 新能源出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{m,t}^{WT,MG} \leq P_{max}^{WT,MG} \\ 0 \leq P_{m,t}^{PV,MG} \leq P_{max}^{PV,MG} \end{cases} \quad (A32)$$

式中: $P_{max}^{WT,MG}$ 、 $P_{max}^{PV,MG}$ 为 WT 和 PV 的预测出力最大值。

6) 功率平衡约束

$$P_{m,t}^{GT} + P_{m,t}^{Line} + P_{m,t}^{PV,MG} + P_{m,t}^{WT,MG} + P_{m,t}^{Dis} - P_{m,t}^{Ch} = P_{m,t}^{L,MG} + P_{m,t}^{trans} + P_{m,t}^{cut} + P_{m,t}^{inter} + P_{m,t}^{P2G} + P_{m,t}^{CCS} \quad (A33)$$

式中: $P_{m,t}^{L,MG}$ 为 t 时段微网 m 的固定负荷。

附录 B

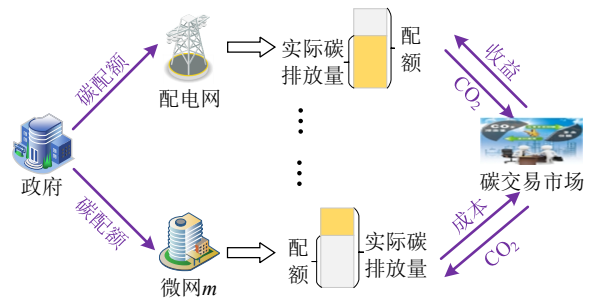


图 B1 MMDS 碳交易机制

Fig. B1 Carbon trading mechanism of MMDS

基于 ATC 的 MMDS 分层分布式求解步骤如下:

1) 数据初始化, 设定耦合变量、节点碳势和罚函数乘子初值, 初次迭代值 $k=1$ 。

2) 配电网优化。配电网运营商根据获取到的耦合变量数据和节点碳势值, 以运行成本和碳流理论下的碳交易成本之和最小为目标(式(22))进行低碳调度问题的求解, 然后根据式(2)计算更新不同时

刻节点碳势矩阵,将得到的期望交互功率值和节点碳势结果传递给多微网运营商,发挥碳流引导下的配-微网交互低碳用能行为,进而改善多微网内部能流分布,提升多微网系统清洁化运行效果。

3) 多微网优化。多微网运营商在根据所获得的电能需求信息和节点碳势信息,以含 CCS-P2G 循环减碳模式下的设备运行成本、激励型需求响应机制的负荷补偿成本和碳流理论下的综合碳交易成本之和最小为目标(式(23))进行低碳调度问题的求解,并将求解得到的期望交互功率值传递给配电网运营商,进而合理优化配电网系统机组出力,提升配电网系统低碳经济运行效果。

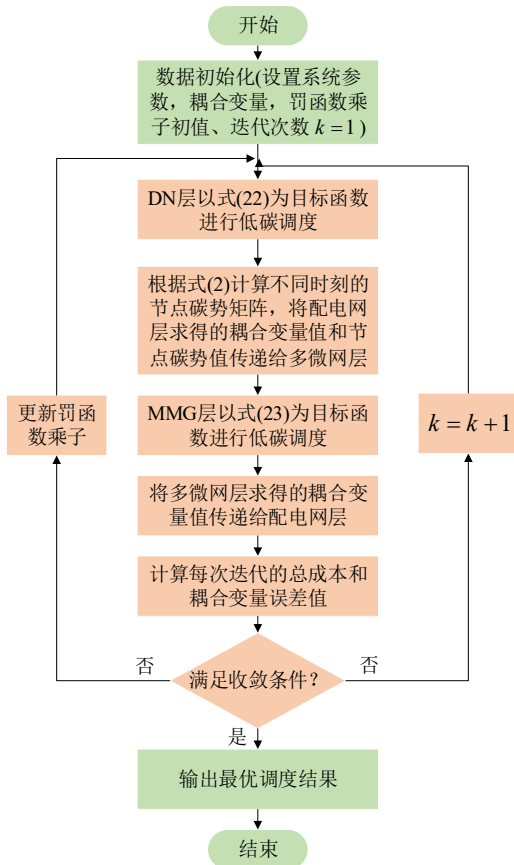


图 B2 基于 ATC 的 MMDS 分层分布式求解流程

Fig. B2 Hierarchical distributed solution flow of MMDS based on ATC

- 4) 计算每次迭代后的总成本和耦合变量差值。
- 5) 判断收敛条件。

收敛判据 1: 双方期待交互功率的差值应满足收敛精度要求。

$$|P_{m,t}^{MG,k} - P_{m,t}^{DN,k}| \leq \varepsilon_1 \quad (B1)$$

收敛判据 2: 前后两次迭代所获得的 MMDS 总成本之差应满足收敛精度要求。

$$\left| \frac{(C_{DN}^{k+1} + C_{MMG}^{k+1}) - (C_{DN}^k + C_{MMG}^k)}{(C_{DN}^k + C_{MMG}^k)} \right| \leq \varepsilon_2 \quad (B2)$$

式中: $(C_{DN}^{k+1} + C_{MMG}^{k+1})$ 为第 $k+1$ 次迭代后的多微网配电系统总成本; $(C_{DN}^k + C_{MMG}^k)$ 为第 k 次迭代后的多微网配电系统总成本; ε_1 、 ε_2 为收敛精度。

若同时满足,则迭代终止,输出最优调度结果。否则,按照式(B3)的方式更新罚函数乘子,置 $k = k + 1$,返回步骤 2。

$$\begin{cases} \alpha_{m,t}^k = \alpha_{m,t}^{k-1} + 2\beta_{m,t}^{k-1}\beta_{m,t}^{k-1}(P_{m,t}^{MG,k-1} - P_{m,t}^{DN,k-1}) \\ \beta_{m,t}^k = \omega\beta_{m,t}^{k-1} \end{cases} \quad (B3)$$

式中: ω 为罚函数乘子二次项更新系数,常取为 $2 \leq \omega \leq 3$ 。

综上,上述基于 ATC 的分布式求解算法,可融合多维联动手段发挥多环节异质资源间减碳提效潜力,将配电网与多微网以经济低碳成本最小为目标进行独立低碳调度,迭代交互功率需求信息与节点碳势信息,优化系统电-碳装置时序运行和功率交互行为。通过多次迭代优化及策略更新,快速精确地生成最优的低碳调度方案,保证系统运行的低碳性和经济性。

ATC 算法收敛性证明:

采用 ATC 实现分层分布式模型的求解并得到收敛下的最优解需要满足以下条件:

1) ATC 在求解一致性问题时需存在不同层次的子问题,且每次迭代时不同子问题需向对方提供其目标/响应值以实现迭代求解^[25]。

2) ATC 在本质上属于最优化方法中的乘子法,故要求优化子问题为凸优化问题,以保证严格收敛^[26]。

3) 此外,在目标函数中添加基于增广拉格朗日的罚函数项可松弛一致性约束,极大增强 ATC 收敛性能^[27]。

对应于本文所建模型中: 1) 多微网和配电网系统属于两个不同运营主体,各自拥有自己的目标函数和约束条件,如式(22)-(23)所示;配电网层独立求解后向多微网层提供目标值和节点碳势值,多微网根据配电网提供的信息进行求解,得到响应值传回配电网层,不断耦合迭代求解,直至满足收敛条件,满足上述 ATC 收敛条件 1,可应用 ATC 模型得到收敛。

2) 多微网和配电网的分层调度模型为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型,随着迭代次数 k 的增加,目标函数 C_{DN} 与 C_{MMG} 均会收敛得到一个最优值,满足凸优化条件,属于凸优化问题,满足上述 ATC 收敛条件 2,可应用 ATC 模型得到收敛。

3) 文中构建了基于拉格朗日罚函数项的目标函数, 如式(22)-(23)所示, 满足上述 ATC 收敛条件 3, 可加快 ATC 收敛过程。此外, 本文设置的罚函数乘子更新系数较大($\omega=2.92$), 可进一步增强 ATC 收敛性能。同时, 根据本文所设置的收敛条件可知, 随着迭代次数 k 的增加, 式(B1)与(B2)的值会逐渐趋于 0, 不同层级间的耦合变量差值会逐渐减少, 使得罚函数项逐渐变小, 不同迭代次数间的目标值会逐渐趋于一致, 直至满足收敛条件。

综上所述, 本文所构建模型均满足上述 ATC 收敛条件, 可实现对 ATC 算法的精确使用, 并且根据本文得到的算例结果很好地验证了 ATC 求解模型的良好收敛性能。因此, 从理论和算例 2 个角度, 本文所使用的分布式算法收敛性均可得到保证, 验证了本文使用 ATC 求解所构建模型的合理性。

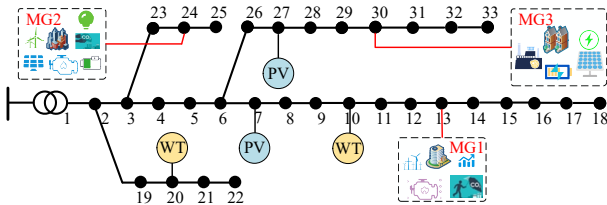


图 B3 含三个微网的 IEEE 33 节点系统结构
Fig. B3 Structure of IEEE 33-node system with three microgrids

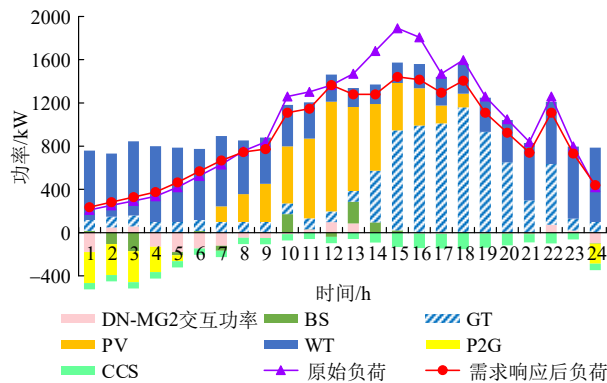


图 B4 含 CCS-P2G 的微网 2 电能优化结果
Fig. B4 Power optimization results of MG2 with CCS-P2G

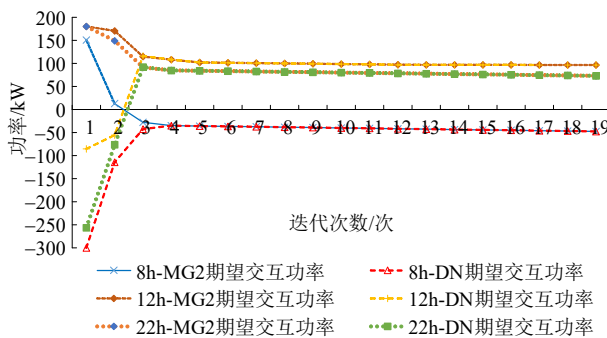


图 B5 联络线交互功率迭代图
Fig. B5 Iterative diagram of tie-line interactive power

附录 C

表 C1 各微网设备配置

设备	PV	WT	GT	BS	CCS	P2G
MG1	—	√	√	—	√	√
MG2	√	√	√	√	√	√
MG3	√	—	√	√	—	—

表 C2 微网设备运行参数

设备	最小功率/kW	最大功率/kW	爬坡功率上限/kW	爬坡功率下限/kW	运维成本系数/(元/(kW·h))
GT	100	1500	450	450	0.053
CCS	0	600	—	—	0.031
P2G	0	300	—	—	0.031

表 C3 微网储能参数

设备	充放电效率	自损耗系数	最小/大荷电状态
BS	0.97	0.02	0.2/0.9
最大充/放电功率	200kW	运维成本系数	总容量
		0.037 元/(kW·h)	800(kW·h)

表 C4 微网技术参数

参数	数值	参数	数值
P2G 效率	0.6	天然气价格	2.5 元/m ³
CCS 捕获效率	0.8	天然气热值	36MJ/m ³
CCS 固定能耗	50kW	碳存储价格	30 元/t
碳交易价格	120 元/t	储能损耗系数	0.05
燃煤机组碳排放强度	0.85t/(MW·h)	光伏运维成本	0.0269 元/(kW·h)
燃气机组碳排放强度	0.102t/GJ	风机运维成本	0.0269 元/(kW·h)
联络线交互功率最大值	300kW	单位电能所能转化的热能	3600MJ/(MW·h)
CCS 处理单位 CO ₂ 所需能耗	0.269MWh/t	生成单位功率天然气所需的 CO ₂ 量	0.2MWh/t
区域总碳配额	10t	初始储碳容量	0.5t

表 C5 MMDS 负荷需求响应配置

配置	MG1	MG2	MG3
可转移负荷	√	√	×
可中断负荷	√	×	×
可削减负荷	×	√	√

表 C6 ATC 算法仿真参数设置

参数	α_m, β_m	ω	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$
取值	0.01	2.92	1e-2

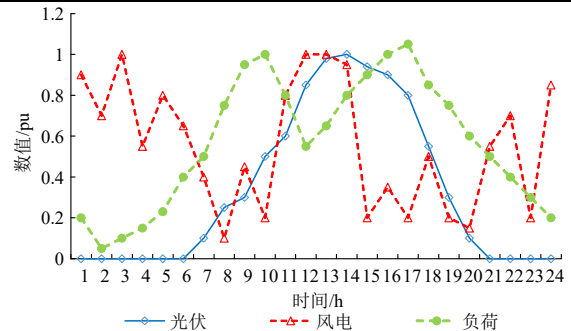


图 C1 配电网分布式电源及电负荷日运行曲线
Fig. C1 Daily operation curves of distributed generators and electricity load in DN

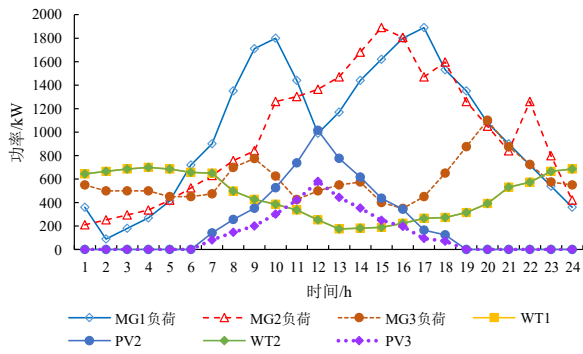


图 C2 各微网风光荷出力情况

Fig. C2 WT, PV and load power of each MG

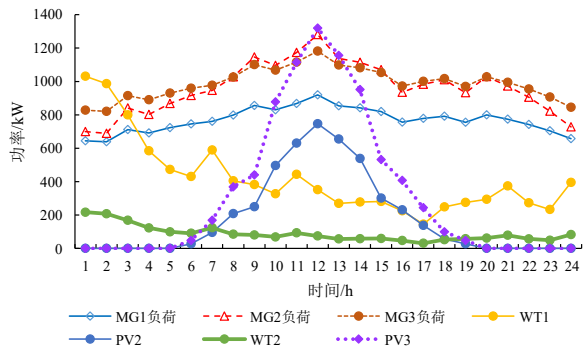


图 C3 夏季各微网风光荷出力情况

Fig. C3 WT, PV and load power of each MG in Summer

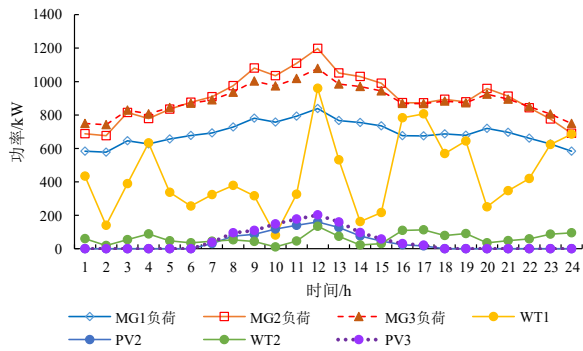


图 C4 冬季各微网风光荷出力情况

Fig. C4 WT, PV and load power of each MG in Winter

附录 D

模型通用性验证:

1) 不同季节典型日算例结果分析

根据附录图 C3 和 C4 的夏冬典型日数据进行算例验证。通过表 D1 可以看出, 相比于夏季, 冬季典型日风光出力较小, 导致其他源端机组出力较大, 系统总运行成本增加。但不同季节的算例均能得到相应的调度结果, 验证了本文所提方法的适用性。而由表 D2 可以看出, ATC 算法在不同季节典型日算例求解中的迭代时间和迭代次数均较少, 同样也验证了 ATC 算法在不同应用场景下仍具备良好的收敛性能。

综合表 D1 和表 D2 的结果可以看出, 本文所提方法在不同季节典型日均能实现较好的低碳调度效

果, 算法收敛性能均能得到保证, 验证了本文所提方法具备一定泛化能力, 能有效应用于不同场景。

表 D1 不同季节典型日优化结果

Table D1 Optimization result of typical day examples for different seasons

季节	碳排放量/吨	多微网运行成本/元	配电网运行成本/元	MMDS 总成本/元
夏季	32.8	23754.3	12989.2	36743.5
冬季	35.5	24942.3	13779.9	38722.3

表 D2 不同季节典型日算法有效性验证

Table D2 Algorithm validation for typical days in different seasons

季节	迭代时间/s	迭代次数/次
夏季	155	14
冬季	135	11

2) 大规模节点算例结果分析

采用含三个微网的 PG&E 69 节点和 IEEE 123 配电网系统对建立的模型进行分析与验证, 分布式电源接入情况、线路及负荷详细参数见文献[30]。其中各微网在 PG&E 69 节点系统中接入 13、24 与 30 节点, 在 IEEE 123 节点中接入 9、14 与 21 节点, 设备运行参数与 IEEE 33 节点相同。

通过表 D3 和表 D4 可以看出, 本文所提方法在大规模算例中均能得到相应低碳调度结果, 算法收敛性能均能得到保证, 只是规模越大, 系统越复杂, 求解的结果不同, 每次的迭代时间相对增长, 但均会优化收敛获得相应结果。因此, 大规模算例结果可验证本文所提方法具备一定泛化能力, 能在不同规模算例中有效应用。

表 D3 大规模节点算例优化结果

Table D3 Optimization result of large-scale node cases

配电网系统拓扑	碳排放量/吨	多微网运行成本/元	配电网运行成本/元	MMDS 总成本/元
IEEE 33	28.9	21269.5	11748.3	33017.3
PG&E 69	27.2	18057.8	14533.3	32590.1
IEEE 123	22.3	23622.2	9384.1	33006.9

表 D4 大规模节点算例下的算法有效性验证

Table D4 Algorithm validation under large-scale node cases

配电网系统拓扑	迭代时间/s	迭代次数/次
IEEE 33	238	19
PG&E 69	328	17
IEEE 123	1780	17