

基于混合博弈的多微电网双层协调优化调度

程杉¹, 陈梓铭¹, 王瑞¹, 何黎君², 魏昭彬¹

(1. 三峡大学 电力系统智能运行与安全防护宜昌市重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 国网湖北省电力有限公司宜昌市高新区供电公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要:考虑多微电网系统(MMGS)和微电网聚合商(MA)所有权不同,以及各微电网(MG)间能量互济与利益分配,提出基于混合博弈的MMGS双层协调优化调度模型及其求解方法。上层MA与下层MMGS之间采用基于Stackelberg的主从博弈,保证MA与MMGS的利益双赢;MA作为领导者,以自身收益最大为目标,在证明Stackelberg博弈均衡解的存在性后,采用基于群感应机制的粒子群优化算法求解上层MA与下层MG交易的内部电价;下层各MG作为跟随者,相互之间采用合作博弈进行电能交易,提高余电共享水平以及实现收益的合理分配;MMGS以最小化自身成本为目标,根据内部电价,利用CPLEX优化计算购、售电计划并反馈至MA。仿真算例表明,所提方法可有效求解MMGS与MA交互的均衡策略,能同时提高MMGS、MA和各MG收益以及更有效地利用MMGS资源。

关键词:多微电网系统;微电网聚合商;混合博弈;粒子群优化算法

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202106009

0 引言

在市场环境下,微电网MG(MicroGrid)不仅能和配电网进行电能交易,而且各MG间也能进行交易^[1-4],即通过能量互济和协同优化控制提升多微电网系统MMGS(Multi-MicroGrid System)的自治和消纳能力并实现经济效益^[5-6]。

近年来,国内外学者对MMGS经济运行和MG利益分配的研究取得了丰硕成果。文献[7]基于合作博弈建立多运营主体MG日前经济调度纳什议价模型,该模型不仅可以使各运营主体获得Pareto最优成本,还可以实现MG的成本最小化;文献[8]提出基于机会约束规划的合作MMGS协调优化方法,以系统总成本最小为目标搭建模型,考虑MG间的合作调度方式,但没有针对合作条件进行深入研究;文献[9]针对MMGS形成合作的机理展开研究,并建立考虑停电风险的MMGS联盟型博弈模型;文献[10]针对光伏MMGS,建立基于合作博弈论的市场买卖模型,并根据MG所获利润大小制定实时交易结算规则。

MG和配电网作为不同的利益主体,其利益博弈给MMGS的经济调度带来了巨大挑战^[11]。为了合理分配利益,制定多利益主体间冲突与合作的博弈策

略是经济调度中需要解决的关键问题之一,也是决策者双赢的重要途径之一^[11-12]。文献[12]基于目标级联分析方法,细化MG与配电网的运行约束和利益博弈,并实现二者运行的解耦和并行求解。文献[13]构建多买方-多卖方格局,搭建运营商和用户分别作为主导者和跟随者的Stackelberg博弈需求响应模型,该模型在提升用户群光伏电量共享水平的同时有效提高了运营商收益和用户用电效益。为了鼓励各MG运营商参与MMGS的电能交易,文献[14]提出基于主从博弈的内部电价优化模型和MMGS两阶段优化模型,该模型既降低了MMGS的净负荷峰均比,又实现了MMGS运营商和MG运营商经济效益的双赢,但无法保证各MG的收益最优;文献[15]将多个MG运营商间的议价交易问题等价于合作博弈优化模型,采用纳什议价方法解决MMGS电能交易问题。

综上所述,对于所有权不同的MG经济运行问题,主要考虑MMGS与配电网的电能交易以及MMGS内部的电能交易,采用合作博弈或Stackelberg博弈策略分析双方之间的交互过程。而将微电网聚合商MA(Microgrid Aggregator)加入配电网投资模型已成为一种新兴商业模型,通过MA与配电网运营商的耦合决策作用实现不同利益主体的双赢^[16]。为此,本文将MA作为配电网和MMGS的中间商,使其参与MMGS优化调度的决策,合理维持MG交易平台秩序,MA自身则通过价格差赚取利润。本文建立基于混合博弈的MMGS双层协调优化调度模型:上层与下层间采用基于Stackelberg的主从博弈,保证MA与MMGS的利益双赢;下层各MG间采用合作博弈以提高能量互济水平以及实现收益的合理分配。

收稿日期:2020-08-12; **修回日期:**2021-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607105);电力系统智能运行与安全防护宜昌市重点实验室开放基金资助项目(2020DLXY01)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607105) and the Open Foundation of Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System(2020DLXY01)

1 多微电网调度框架

图1为多微电网调度框架及混合博弈示意图,每个MG由风机与光伏等可再生分布式能源、储能(BT)和负荷组成。上层MA作为Stackelberg博弈的领导者,可以与配电网和MMGS进行电能交互,以最大化自身的经济利益 f_{MA} 为目标,制定与下层MMGS间的购电价格集合 θ^s 和售电价格集合 θ^b 。各MG作为跟随者,旨在通过余、缺电MG间的合作达到成本最小,其根据上层下达的内部电价,在满足自身约束的情况下将计算出的最优购/售电计划集合 P_M 反馈给上层。MMGS、MA以及配电网之间的交易是余、缺电MG间先进行合作,确定合作的电量 P_h ,通常余电MG向MA的售电价格要小于缺电MG向MA的购电价格,因此若余、缺电MG之间达成协议形成合作联盟,则可以提高余电共享水平,实现整体效益的提升。若合作后余电MG仍有余电,则出售给MA;若合作后缺电MG仍缺电,则通过MA从配电网购电来满足自身需求。

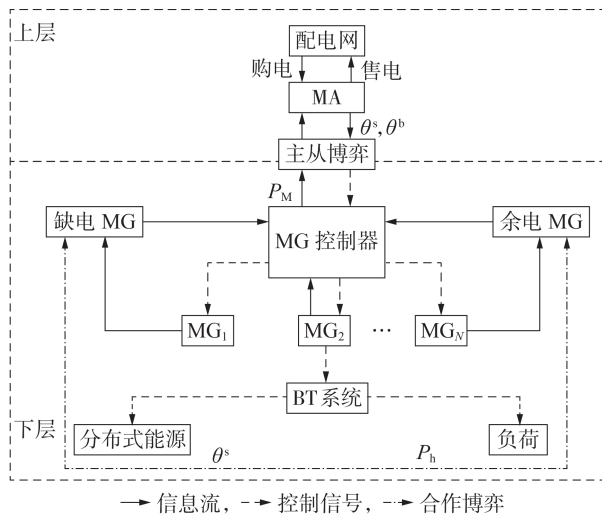


图1 多微电网调度框架及混合博弈示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-microgrid dispatching framework and mixed game

2 上层优化模型

2.1 目标函数

在新兴商业模型中,MA通常作为投资企业,介于电网公司与MG、用户等之间,通过为多方提供服务获得收益,其更侧重于收益和市场竞争能力。

$$\max f_{MA} = \sum_{k=1}^N \sum_{t=0}^T \left[\max(P_{k,t}, 0)(G_t^b - \theta_t^s) - \min(P_{k,t}, 0)(\theta_t^b - G_t^s) \right] \quad (1)$$

其中, N 为MG数量; $T=23$; $P_{k,t}$ 为 t 时刻 MG_k 与MA之间的购、售电功率,其值大于0时,表示 MG_k 售电给MA,反之则表示 MG_k 向MA购电; G_t^s 、 G_t^b 分别为 t 时刻MA和配电网之间的购、售电价格; θ_t^s 、 θ_t^b 分别为

时刻MA与下层MMGS之间的购、售电价格。

2.2 约束条件

1)内部电价约束。

$$G_t^s < \theta_t^s < \theta_t^b < G_t^b \quad (2)$$

2)购售电功率约束。

$$P_k^{\min} \leq P_{k,t} \leq P_k^{\max} \quad (3)$$

其中, P_k^{\max} 、 P_k^{\min} 分别为 $P_{k,t}$ 的上、下限。每个MG都可以从MA购电或者向其售电,但不允许同时处于购电状态和售电状态。

3 下层优化模型

效用函数被广泛应用于描述消费者消耗某种商品时所获得的满意度^[17],本文采用二次效用函数^[18]描述 t 时刻 MG_k 消耗电能所获得的满意度 $U_{k,t}^W$:

$$U_{k,t}^W = e_n \max(P'_{k,t}, 0) - \frac{d_n}{2} (\max(P'_{k,t}, 0))^2 \quad (4)$$

其中, e_n 、 d_n 为MMGS对消耗电能的偏好常系数; $P'_{k,t}$ 为 MG_k 在 t 时刻的净功率,其值大于0时,表示 MG_k 处于售电状态,反之则表示 MG_k 处于购电状态。

3.1 MG合作模型

在配电区域内的MMGS中,合作方是有意愿参加联盟的余、缺电MG,双方形成合作联盟 s 后,可将其看作一个等效MG。该等效MG整体与MA进行交易,因此可以计算得到联盟 s 下 MG_k 与MA之间的交易成本 $C_{k,t}^P$ ^[10]为:

$$C_{k,t}^P = \theta_t^b \min(P'_{k,t}, 0) - \theta_t^s \max(P'_{k,t}, 0) - \Delta v \quad (5)$$

$$\Delta v = \sum_{t=0}^T \min \left(\sum_{k \in P} P'_{k,t} - \sum_{k \in Q} P'_{k,t} \right) (\theta_t^b - \theta_t^s) \Delta t \quad (6)$$

其中, $\Delta t=1$ h为单位调度时长; P 、 Q 分别为余、缺电MG的编号集合; Δv 为相对于各MG与配电网直接交易合作模型增加的总收益。

由于缺电MG从MA的购电价格要大于余电MG向MA的售电价格,假如形成联盟,即 t 时刻余、缺电MG间有电力交互,则余电MG以更低的价格售电给缺电MG,因此,相对于与MA直接交易减少的成本就是联盟的“合作剩余”(如附录A图A1所示),该“合作剩余”即为联盟整体获得的更高收益。

合作博弈中的联盟和分配满足:联盟 s 整体收益不小于各MG单独运营时的收益之和;联盟 s 中每个MG分配到的收益大于单独运营时所得收益。在合作博弈中联盟成员间交换信息,必须强制执行所达成的协议。合作博弈可以产生“合作剩余”来提高合作利益,而“合作剩余”如何分配,则取决于博弈各方的制度设计以及力量对比。

采用Shapley值法分配收益 v 需满足:

$$v(\emptyset) = 0 \quad (7)$$

$$v(s_1 \cup s_2) \geq v(s_1) + v(s_2) \quad (8)$$

其中, s_1 和 s_2 表示参加合作的 MG 双方; $v(s_1 \cup s_2)$ 为 MG 合作时的收益; $v(s_1)$ 、 $v(s_2)$ 为各 MG 单独运行时的收益。

式(7)显然满足。从前文分析可知, MMGS 合作时的收益要不小于各 MG 单独运行时的收益之和, 即本文合作模型也满足式(8)。

对于任意 MG_k 的收益 v_k 为:

$$v_k = \sum_{k \in s_k} \omega(|s|)(v(s) - v(s/k)) \quad k=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$\omega(|s|) = \frac{(N-|s|)(|s|-1)!}{N!} \quad (10)$$

其中, s_k 为联盟中包含 MG_k 的所有子集; $|s|$ 为联盟 s 中的用户数; $\omega(|s|)$ 为加权因子; $v(s/k)$ 表示联盟 s 中除去 MG_k 后剩下 MG 形成合作联盟所获得的总收益。

3.2 目标函数

$$\min U_{MG} = \sum_{k=1}^N \sum_{t=0}^T (C_{k,t}^{MT} + C_{k,t}^{Bat} + C_{k,t}^P - U_{k,t}^W) \quad (11)$$

其中, U_{MG} 为 MMGS 的运行成本; $C_{k,t}^{MT}$ 、 $C_{k,t}^{Bat}$ 分别为 MG_k 中的微型燃气轮机(MT)、BT 在 t 时刻的运行成本, 分别见式(12)和式(13)。

$$C_{k,t}^{MT} = c_k^{gas} \frac{P_{k,t}^{MT}}{\eta_{MT} L_{HVNG}} \quad (12)$$

$$C_{k,t}^{Bat} = c_{dis} P_{k,t}^{dis} + c_{ch} P_{k,t}^{ch} \quad (13)$$

其中, c_k^{gas} 为 MG_k 购买天然气的单位价格; $P_{k,t}^{MT}$ 为 MT 在 t 时刻的发电功率; η_{MT} 为 MT 的发电效率; L_{HVNG} 为天然气低热值; $P_{k,t}^{ch}$ 、 $P_{k,t}^{dis}$ 分别为 BT 在 t 时刻的充、放电功率, c_{ch} 、 c_{dis} 为相应的单位运行管理成本。

3.3 约束条件

1) 功率平衡约束。

$$x_{k,t} = P_{k,t}^{PV} + P_{k,t}^{WT} + P_{k,t}^{MT} + P_{k,t}^{dis} - P_{k,t}^{ch} + P_{k,t}^{pb} - P_{k,t}^{ps} \quad (14)$$

$$P'_{k,t} = P_{k,t}^{PV} + P_{k,t}^{WT} + P_{k,t}^{MT} + P_{k,t}^{dis} - P_{k,t}^{ch} - x_{k,t} \quad (15)$$

其中, $x_{k,t}$ 为 MG_k 在 t 时刻的日前负荷预测值; $P_{k,t}^{PV}$ 、 $P_{k,t}^{WT}$ 分别为 t 时刻的光伏、风机预测出力值; $P_{k,t}^{pb}$ 、 $P_{k,t}^{ps}$ 分别为 MG_k 购买、售出的功率。

2) MT 运行约束。

$$P_{k,t}^{MT, \min} \leq P_{k,t}^{MT} \leq P_{k,t}^{MT, \max} \quad (16)$$

其中, $P_{k,t}^{MT, \max}$ 、 $P_{k,t}^{MT, \min}$ 分别为 $P_{k,t}^{MT}$ 的上、下限。

MT 爬坡速率约束:

$$R_{MT, d} \Delta t \leq P_{k,t+1}^{MT} - P_{k,t}^{MT} \leq R_{MT, u} \Delta t \quad (17)$$

其中, $R_{MT, u}$ 、 $R_{MT, d}$ 分别为爬坡速率的上、下限。

3) BT 运行约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k,t}^{dis} \leq k_t^{dis} P_k^{dis, \max} \\ 0 \leq P_{k,t}^{ch} \leq k_t^{ch} P_k^{ch, \max} \\ k_t^{dis} + k_t^{ch} \leq 1 \\ k_t^{dis}, k_t^{ch} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $P_k^{dis, \max}$ 、 $P_k^{ch, \max}$ 分别为 $P_{k,t}^{dis}$ 、 $P_{k,t}^{ch}$ 的上限; k_t^{ch} 、 k_t^{dis} 分别为 BT 的充、放电状态, 二者不同时为 1。

$$\begin{cases} E_k^{\min} \leq E_{k,t} \leq E_k^{\max} \\ E_{k,t+1} = E_{k,t} + P_{k,t+1}^{ch} \Delta t - P_{k,t+1}^{dis} \Delta t \end{cases} \quad (19)$$

其中, $E_{k,t}$ 为 t 时刻的 BT 电量; E_k^{\max} 、 E_k^{\min} 分别为 $E_{k,t}$ 的上、下限。

为保证周期性调度, BT 系统在每日的始、末电量需保持一致, 即:

$$E_{k,0} = E_{k,23} \quad (20)$$

4 Stackelberg 博弈模型

上、下层的 Stackelberg 博弈模型可表示为:

$$G = \{(MA \cup MMGS), P_M, \theta^s, \theta^b, f_{MA}, U_{MG}\} \quad (21)$$

其中, MA 和 MMGS 表示 MA 和 MMGS 是博弈方。

由于各 MMGS 和 MA 的目标分别为成本最小化和利润最大化, MA 会制定最优的内部电价, MMGS 会依据内部电价决策最优购、售电计划, 从而达到博弈的均衡。假设 $(P^*, \rho_{pb}^*, \rho_{ps}^*)$ 为 G 的一个策略集, 其为 Stackelberg 博弈均衡需满足:

$$U_{MG}(P^*, \rho_{pb}^*, \rho_{ps}^*) \geq U_{MG}(P_C, P_C^*, \rho_{pb}^*, \rho_{ps}^*) \quad \forall P_C \in P_M \quad (22)$$

$$\begin{cases} f_{MA}(P^*, \rho_{pb}^*, \rho_{ps}^*) \geq f_{MA}(P^*, \rho_{pb}, \rho_{ps}^*) \\ f_{MA}(P^*, \rho_{pb}^*, \rho_{ps}^*) \geq f_{MA}(P^*, \rho_{pb}^*, \rho_{ps}) \end{cases} \quad \forall \rho_{pb} \in \theta^b, \forall \rho_{ps} \in \theta^s \quad (23)$$

其中, P^* 为 MG 最优的购售电计划集合; ρ_{pb}^* 、 ρ_{ps}^* 为 MA 的最优内部电价集合; P_C^* 为除 P_C 外的其他策略。

当博弈均衡时, MA 无法通过调整内部电价增加利润, 各 MG 也不能改变充、放电计划来减少成本。

4.1 Stackelberg 博弈均衡存在性证明

当 G 存在均衡解时, 需满足如下条件^[19]: ①策略集 θ^s 、 θ^b 均为关于其欧氏空间的非空的、凸的、有界的子集; ② U_{MG} 为关于 $P'_{k,t}$ 的拟凹函数; ③ f_{MA} 为关于 θ^s 、 θ^b 和 $P'_{k,t}$ 的连续函数。

显然条件③是满足的。由式(2)可知, θ^s 和 θ^b 满足条件①。由式(4)、(5)、(11)~(13)可知, U_{MG} 是严格凹函数, 而其他项均为关于 $P'_{k,t}$ 的线性或常数函数, 即 U_{MG} 是关于 $P'_{k,t}$ 的凹函数, 而凹函数一定是拟凹函数, 因此满足条件②。

综上, G 存在均衡解。

4.2 混合博弈模型求解

将粒子群优化算法^[17,20]和 CPLEX 软件相结合求解混合博弈模型, 流程图如附录 A 图 A2 所示。具体步骤为:

1) 初始化种群, 令迭代次数 $h=0$;

2) MMGS 根据 $\theta^{s,h}$ 、 $\theta^{b,h}$ ($\theta^{s,h}$ 、 $\theta^{b,h}$ 为迭代次数为 h 时的内部电价), 利用 CPLEX 求解下层问题得到最优充、放电计划 P'_c 并反馈给 MA;

3) MA 根据式(1)计算目标函数 f_{MA} ;

4) 更新粒子的个体最优 $\theta^{s,h}$ 和全局最优 $\theta^{b,h}$, 根据式(1)计算目标函数 f'_{MA} ;

5) 进行选择操作, 若满足 $f_{MA} > f'_{MA}$, 则将 $\theta^{s,h}$ 、 $\theta^{b,h}$ 作为下一次迭代的内部电价, 否则将 $\theta^{s,h}$ 、 $\theta^{b,h}$ 作为下一次迭代的内部电价;

6) 令 $h=h+1$, 若 $h \leq h_{\max}$ (h_{\max} 为最大迭代次数), 则转至步骤2), 否则输出最优结果。

5 算例仿真及分析

选取一个含有3个MG的配电网进行仿真, 各MG实时公布各自缺电或余电信息, 余、缺电MG间形成联盟, 各MG参数见附录A表A1(表中各功率值均为功率上限, 下限设定为0, BT容量下限和初始电量分别设为总容量的25%和50%), 电网公司分时电价见附录A表A2, 各MG中的风电、光伏、负荷预测曲线及其净功率分别见附录A图A3和A4。MG₁天然气价格为2.28元/m³, MG₂与MG₃天然气价格均为3.25元/m³, $\eta_{MT}=30\%$, $L_{HVNG}=9.7 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$; $c_{dis}=0.4 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $c_{ch}=0.6 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; 设 $e_n=60$ 、 $d_n=0.1$ 。

由附录A图A4可知, 在06:00—20:00和23:00—24:00时段, MG₁余电, MG₂和MG₃缺电, 即3个MG可以形成联盟。而在00:00—06:00和20:00—23:00时段, 只存在余电或缺电MG, 不能形成联盟, 则在该时段对于余/缺电量直接与MA进行交易。对于极端情况, 即全天均只有余电或缺电MG的情况, 不能形成合作, 且实际中一般不会出现。

设置4种策略进行对比分析: 策略1, MMGS和MA之间直接交易, 各MG间无电能交易; 策略2, MMGS和MA之间直接交易, 各MG间采用合作博弈策略; 策略3, MMGS和MA之间采用主从博弈策略, 各MG间无电能交易; 策略4, MMGS和MA之间采用主从博弈策略, 各MG间采用合作博弈策略。4种策略下MMGS与MA之间的交互功率如图2所示。

对比策略1和2可知, 其对应交互功率之和分别为2455.5、2022.8 kW, 显然MMGS内部采用合作博弈策略时加强了MG间的功率交互, 提升了内部的电力共享水平, 减少了各MG与MA之间的交互功率。对比策略2和4可知, 峰/谷时段其对应交互功率分别为1275.7 kW / 192.8 kW、1155.6 kW / 353.5 kW, 可见MA与MMGS之间采用主从博弈策略可以降低峰时段的交互功率以及增加谷时段的交互功率, 起到了削峰填谷的作用。因此, MA和MMGS间的主从博弈和MMGS内部的合作博弈可以实现资源的合理利用, 有效提高MG和MA的利润。表1和表2分别给出了MMGS总成本和MA收益。

由表1可见, 策略4下MMGS总成本最低, 相较

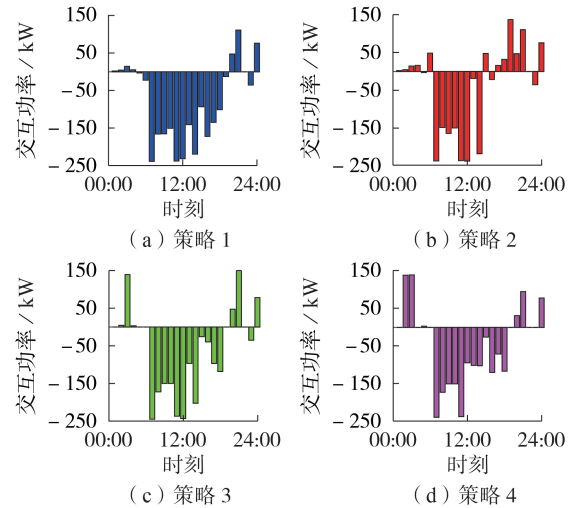


图2 4种策略下MMGS与MA之间的交互功率

Fig.2 Interaction power between MMGS and MA under four strategies

表1 MMGS总成本

Table 1 Total cost of MMGS

MG	成本/元			
	策略1	策略2	策略3	策略4
MG ₁	-788.66	-923.25	-800.17	-970.12
MG ₂	556.23	470.15	518.32	420.36
MG ₃	4607.82	4485.33	4525.83	4432.63
MMGS总成本/元	4375.39	4032.23	4243.98	3882.87

表2 MA收益

Table 2 Revenue of MA

策略	收益/元	策略	收益/元
1	958.01	3	998.19
2	935.56	4	987.62

于策略3, 各MG的成本都有所降低, 证明了MG采用合作博弈策略的优势, 同理与策略2对比可证明MMGS和MA之间采用主从博弈策略的优势。由表2可见, MG间的合作会减少从MA的购电量, 但上、下层之间采用Stackelberg博弈在一定程度上增加了双方的收益, 进一步说明了本文策略的优势。

策略4下的内部电价如图3所示。由图可见, 内部电价始终处于电网公司制定的分时电价之间, 在分时电价低谷及平时段内部电价较高, 可提升MG售电量, 在高峰时段内部电价较低, 有利于MG购

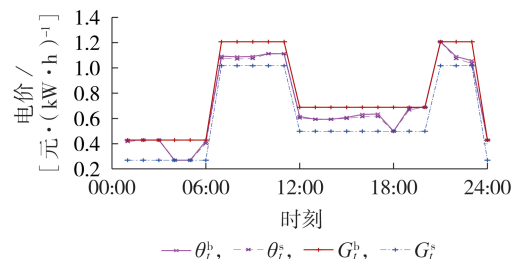


图3 策略4内部电价

Fig.3 Internal electricity price of Strategy 4

电,验证了所提优化调度策略的合理性及有效性。

策略 4 下的 BT 电量和 MT 出力如图 4 所示。由图可见:各 MT 出力主要分布在 06:00—12:00 和 19:00—24:00 时段,其在高峰期进行供电;各 BT 在 04:00—06:00 和 12:00—14:00 时段进行充电,且主要集中在 20:00—23:00 时段进行放电,起到了削峰填谷的作用,这是由于 04:00—06:00 时段负荷较小,风电和光伏在满足负荷需求后给 BT 充电,而 12:00—14:00 时段负荷虽然增大,但风电和光伏的出力也很大,在 20:00—23:00 时段负荷减小,但风电和光伏的出力也减小,不能满足负荷需求,此时各 BT 放电,并且 MT 运行,使 MMGS 和 MA 间交互功率减小。

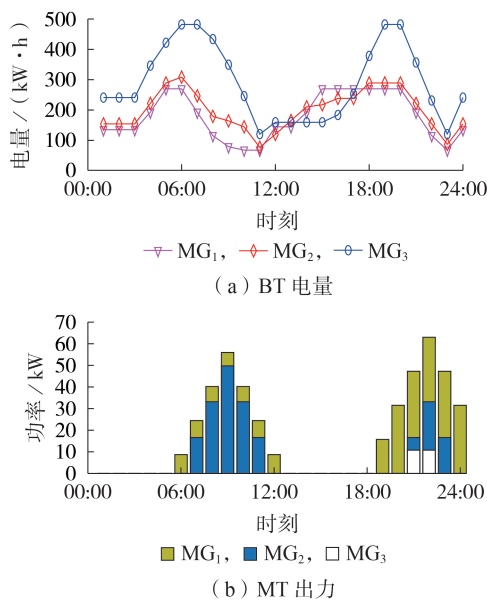


图 4 策略 4 下 BT 电量和 MT 出力

Fig.4 BT energy and MT output under Strategy 4

6 结论

本文将混合博弈应用于不同利益主体的 MA 与 MMGS 交互模型中,结合粒子群优化算法和 CPLEX 软件,分别对博弈参与者 MMGS 成本最小化与 MA 收益最大化的问题进行迭代求解,并证明了混合博弈均衡解的存在性。最后,结合具体仿真算例及对比分析验证了所提模型及算法的有效性。仿真结果表明,采用本文所提基于混合博弈的双层优化调度模型不仅能提高 MA 和 MMGS 利润,实现每个 MG 的利益最优,而且还可以充分利用 MMGS 资源,避免因资源闲置带来的经济损失。

本文仅采用风电、光伏和负荷的预测数据,而没有考虑其不确定性对调度计划的影响,这将是下一步的研究重点。

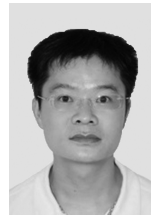
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王守相,张齐,王瀚,等. 高可再生能源渗透率下的区域多微电网系统优化规划方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):33-38,52.
WANG Shouxiang,ZHANG Qi,WANG Han,et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):33-38,52.
- [2] 伍雨柔,程杉,魏荣宗. 基于双向拍卖的多微电网协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(3):96-101.
WU Yurou,CHENG Shan,WEI Rongzong. Coordinated optimization scheduling of multi-microgrid based on double-auction [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2019,31(3):96-101.
- [3] 何黎君,程杉,陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(11):10-17.
HE Lijun,CHENG Shan,CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control,2020,48(11):10-17.
- [4] 程杉,倪凯旋,赵孟雨. 基于 Stackelberg 博弈的充换储一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):49-55,69.
CHENG Shan,NI Kaixuan,ZHAO Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):49-55,69.
- [5] 彭春华,张金克,陈露,等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):1-7.
PENG Chunhua,ZHANG Jinke,CHEN Lu,et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):1-7.
- [6] 秦金磊,孙文强,朱有产,等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):130-138.
QIN Jinlei,SUN Wenqiang,ZHU Youchan,et al. Energy transaction method of microgrid based on blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(11):130-138.
- [7] 吴鸣,寇凌峰,张进,等. 多运营主体微电网日前经济优化调度纳什议价方法[J]. 中国电力,2019,52(11):19-27,117.
WU Ming,KOU Lingfeng,ZHANG Jin,et al. A day-ahead Nash bargaining method for economic dispatch of the multi-operator micro-grid[J]. Electric Power,2019,52(11):19-27,117.
- [8] 杨得洋,刘洋,沈晓东,等. 基于机会约束的多微网合作调度模型[J]. 电测与仪表,2019,56(18):41-48.
YANG Deyang,LIU Yang,SHEN Xiaodong,et al. Cooperative dispatch model of multi-microgrid based on chance constrained programming[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(18):41-48.
- [9] 赵敏,沈沉,李顺昕,等. 采用联盟型博弈考虑停电风险的多微电网合作条件研究[J]. 控制理论与应用,2018,35(5):688-698.
ZHAO Min,SHEN Chen,LI Shunxin,et al. Coalitional game theoretic method to study multi-microgrids cooperation condition considering outage risk[J]. Control Theory & Applications,2018,35(5):688-698.
- [10] 刘念,赵璟,王杰,等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报,2018,33(8):1903-1910.
LIU Nian,ZHAO Jing,WANG Jie,et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(8):1903-1910.

- [11] 徐青山,李淋,盛业宏,等. 冷热电联供型多微网主动配电系统日前优化经济调度[J]. 电网技术,2018,42(6):1726-1735.
XU Qingshan,LI Lin,SHENG Yehong,et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution power system with combined cooling,heating and power-based microgrids[J]. Power System Technology,2018,42(6):1726-1735.
- [12] 谢敏,吉祥,柯少佳,等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报,2017,37(17):4911-4921,5210.
XIE Min,JI Xiang,KE Shaojia,et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(17):4911-4921,5210.
- [13] 王程,刘念,成敏杨,等. 基于Stackelberg博弈的光伏用户群优化定价模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):146-153.
WANG Cheng,LIU Nian,CHENG Minyang,et al. Stackelberg game based optimal pricing model for photovoltaic prosumer-cluster[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(12):146-153.
- [14] 佟新,胡存刚,芮涛. 基于主从博弈的多微电网系统经济优化方法[J]. 中国电力,2019,52(6):68-76.
TONG Xin,HU Cungang,RUI Tao. Master-slave game based on economic optimization method of multi-microgrid system[J]. Electric Power,2019,52(6):68-76.
- [15] 芮涛,李国丽,王群京,等. 配电侧多微电网日前电能交易纳什议价方法[J]. 电网技术,2019,43(7):2576-2585.
RUI Tao,LI Guoli,WANG Qunjing,et al. Nash bargaining method for multi-microgrid energy trading in distribution network[J]. Power System Technology,2019,43(7):2576-2585.
- [16] 唐权,胥威汀,叶希,等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(17):83-92.
TANG Quan,XU Weiting,YE Xi,et al. Optimized configuration of distributed energy storage system in distribution network considering the participation of aggregators[J]. Power System Protection and Control,2019,47(17):83-92.
- [17] LIU N,CHENG M Y,YU X H,et al. Energy-sharing provider for PV prosumer clusters:a hybrid approach using stochastic programming and Stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(8):6740-6750.
- [18] PAUDEL A,CHAUDHARI K,LONG C,et al. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid:a game-theoretic model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(8):6087-6097.
- [19] 林凯骏,吴俊勇,刘迪,等. 基于双层Stackelberg博弈的微电网能量管理优化[J]. 电网技术,2019,43(3):973-983.
LIN Kaijun,WU Junyong,LIU Di,et al. Energy management optimization of micro energy grid based on hierarchical Stackelberg game theory[J]. Power System Technology,2019,43(3):973-983.
- [20] CHENG S,SU G C,ZHAO L L,et al. Dynamic dispatch optimization of microgrid based on a QS-PSO algorithm[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy,2017,9(4):045505.

作者简介:



程杉

程杉(1981—),男,湖北宜昌人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电力系统运行优化与控制(E-mail: hpucquyu@ctgu.edu.cn);

陈梓铭(1995—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向为多微电网能量优化管理(E-mail: 779592333@qq.com);

王瑞(1996—),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为多微电网能量优化管理(E-mail: 1094888438@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

Double-layer coordinated optimal dispatching of multi-microgrid based on mixed game

CHENG Shan¹,CHEN Ziming¹,WANG Rui¹,HE Lijun²,WEI Zhaobin¹

(1. Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Yichang High-tech Zone Power Supply Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: Considering the ownerships of MMGS (Multi-MicroGrid System) and MA (Microgrid Aggregator) are different and energy exchange and benefit distribution among each MG (MicroGrid), a double-layer coordinated optimal dispatching model based on mixed game of MMGS and its solving method are proposed. The master-slave game based on Stackelberg is adopted between the upper layer MA and the lower layer MMGS to guarantee a win-win result between MA and MMGS. MA, as the leader, takes its maximum benefit as the object, after the existence of Stackelberg game equilibrium solutions is verified, the particle swarm optimization algorithm based on quorum-sensing mechanism is adopted to solve the internal electricity price between the upper layer MA and the lower layer MGs. The lower layer MGs, as the followers, adopt cooperative game to trade electricity between each other, which improves residual electricity sharing level and realizes rational benefit distribution. MMGS takes its minimum cost as the object, and uses CPLEX to optimize electricity trading plan according to the internal electricity price and feeds it back to MA. The simulation example shows that the proposed method can effectively solve the equilibrium strategy between MMGS and MA, improve the benefit of MMGS, MA and each MG simultaneously, and make more effective use of MMGS resources.

Key words: multi-microgrid system; microgrid aggregator; mixed game; particle swarm optimization algorithm

附录 A:

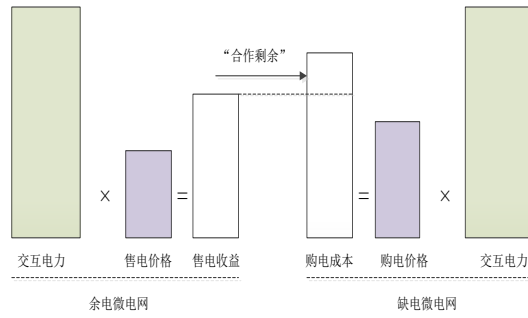


图 A1 “合作剩余” 示意图

Fig.A1 Schematic diagram of “cooperative surplus”

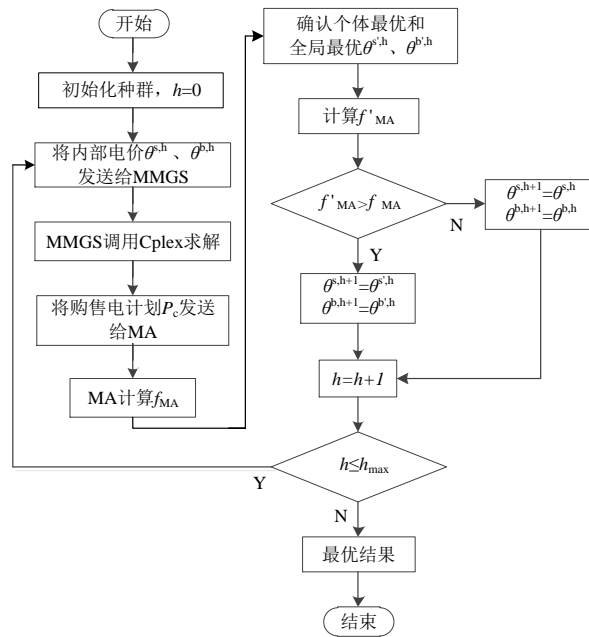


图 A2 混合博弈求解流程图

Fig.A2 Flowchart of mixed game solution

表 A1 MG 参数

TableA1 Parameters of MG

MG	MT 功率/kW	BT 功率/kW	BT 容量/kW	交换功率/kW
MG ₁	95	80	280	200
MG ₂	65	70	320	200
MG ₃	100	130	500	300

表 A2 分时电价

Table A2 Time of use price

时段	区间划分	售电电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	购电电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰	06:00—11:00, 19:00—23:00	1.21	1.02
平	11:00—19:00	0.69	0.50
谷	23:00—06:00	0.43	0.27

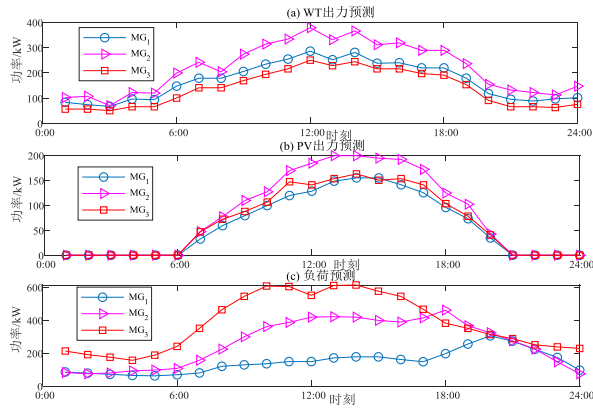


图 A3 风电、光伏和日负荷预测曲线

Fig.A3 Forecasting curves of WT, PV and daily load

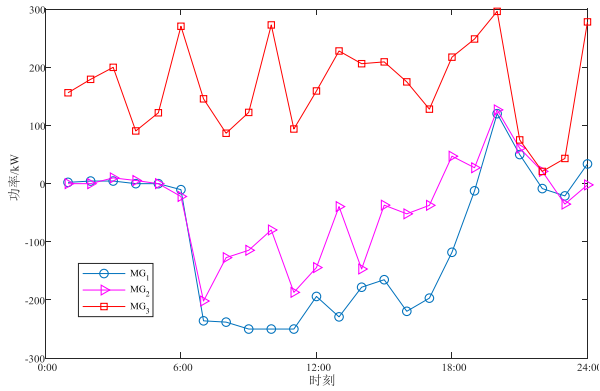


图 A4 各 MG 净功率曲线

Fig.A4 Net power curves of each MG