

基于动态诚信因子的主从博弈抑制微电网虚假信息交易研究

张莹, 王敬华, 陈文钢, 陈佳佳, 徐丙垠, 尹文良
(山东理工大学, 山东 淄博 255000)

摘要: 为了解决微电网群内交互信息中存在的虚假信息问题,在考虑微电网(Microgrid, MG)诚信行为的基础上,文章提出了一种基于动态诚信因子的主从博弈电能交易机制。首先,以MG上报电量与实际交易电量为基准,建立奖惩机制,通过动态调整诚信因子来调节交易电价。其次,构建了一个以微电网群运营商(Microgrid Cluster Operator, MGCO)为领导、MG为跟随者的主从博弈模型。上层模型以最小化微电网群整体功率波动为目标,通过建立交易定价的合约机制,有针对性地调节群内交易电价;下层模型以MG运行费用最小为目标,根据群内交易电价动态调整自身购售电需求量,实现电能优化。最后,通过算例分析验证了该交易机制能够有效抑制微电网群内人为上报虚假信息的行为。

关键词: 微电网群; 虚假信息; 双层优化; 主从博弈; 奖惩机制

中图分类号: TK51; TK89; TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)06-0827-09

0 引言

微电网(Microgrid, MG)集群化运作有助于实现电能互补,提高新能源的就地消纳率、用电经济性和供电可靠性,是实现“双碳”目标的重要手段,是未来发展的趋势^[1-3]。然而,微电网群内各MG往往分属不同的利益主体^[4,5],出于隐私保护的需,MG上报的交易信息不能完全展现其真实能情况,加剧了不完全信息出现的风险,导致群内交互信息中易掺杂虚假的购售信息。这些虚假信息容易干扰群内交易定价,损害公平性交易原则,影响各MG的收益与成本,不利于微电网群内交易的稳定运行。因此,面对错综复杂的交互关系,如何平衡各方收益,研究虚假信息对MG收益及成本的影响,找到抑制虚假信息的策略十分必要。

目前,为平衡各方收益,博弈论常被应用于微电网群能量调度研究。文献[6-9]引入主从博弈理论,对微电网群的电能交易进行研究,实现了微电网群的电能交易。文献[6]提出了一种共享储能背景下,微网运营商与用户聚合商间的主从博弈模型,有效权衡两者间的利益,实现了收益双赢。文献[7]构建了符合MG运营商和用户利益关系的主从博弈模型,充分考虑到负荷差异化,实现电量电

价弹性价格型需求响应。文献[9]构建了主从博弈模型,采用滚动优化确定下一时段的调度策略,有效提升了微电网群的经济效益。

上述文献均在完全信息场景下实现了微电网群的电能交易,并未涉及不完全信息场景。实际应用中,因通信行为本身存在信息丢包、延迟,风光出力预测存在误差等问题,加大了不完全信息的风险,导致上报信息与实际交易量存在偏差。文献[10-13]通过建立奖惩机制应对不完全信息场景下带来的交易功率偏差问题。针对不完全场景下的交易问题,文献[10]以日前交易功率与配电网下发计划交易功率的匹配程度为基准,调整交易电价,提出一种基于动态奖惩电价的双层优化方法,减轻了因MG接入对配网带来的影响。文献[11]根据出力偏差动态调整节点信誉值,依据信誉值将成员的违约行为折算到经济维度,得到违约成本,保障参与主体利益。文献[12]以实际用电量与期望用电量为基准,提出一种非线性奖惩激励的电价机制,该机制能够根据用户的实际用电行为给予奖励或惩罚,化解了固定分档电价机制带来的收费分档和电力供需矛盾。文献[13]设计了一种基于信用的记账权竞争算法,使用户信用值直接与经济收益相关联,以此激励用户保持良好的发

收稿日期: 2022-09-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005306)。

通信作者: 陈文钢(1977-),男,博士,副教授,研究方向为智能配电网自动化技术及应用。E-mail: baiheshu@163.com

用电行为。此外, MG 保护隐私的行为导致信息校对的困难, 加剧了不完全信息出现的风险, 造成 MG 因上报虚假信息而获取收益^[4]。因此, 有必要研究 MG 间交易的定价机制, 抑制虚假信息上报的行为。

针对以上问题, 本文在考虑 MG 存在上报虚假信息的基础上, 提出了一种报量不报价的交易机制^[5], 建立了以上层微电网群运营商(Micro-Grid Cluster Operator, MGCO) 为领导者、下层各 MG 作为跟随者的主从博弈双层优化数学模型。该双层优化模型下层以 MG 自身运行费用最低为目标, 根据 MGCO 反馈的信息, 调整交易量; 上层 MGCO 作为能量中心, 具有定价权, 在满足交易定价合约前提下, 制定交易电价, 引导 MG 参与交易, 降低微电网群整体功率波动。为抑制人为上报虚假信息的行为, 通过对上报量与真实交易量进行对比, 引入动态诚信因子, 从而调整上报虚假信息方交易价格, 降低其奖励收益。最后, 通过算例验证了该交易机制在保障各方信息隐私的前提下, 降低了微电网群的整体功率波动和上报虚假信息的可能性, 提高了各方的经济效益和群内交互信息的安全性。

1 动态奖惩机制

1.1 微电网群优化框架

本文所研究的微电网群系统架构模型如图 1 所示。MG 内部包括储能、风机、光伏和负荷等设备, 独立的能量管理系统能够对内部各装置进行调度, 实现经济运行。MG 与配电网相连, 保证了其拥有自由选择电力市场的权利, 即在群内电价不合理时, 能够与外部进行交易^[16]。MG 与 MGCO 作为独立的利益主体, 二者各自决策又相互影响, 形成博弈格局, 且其地位不对等, 构建了以 MGCO 为领导的主从博弈的电能交易机制, 实现微电网群的电能交易。

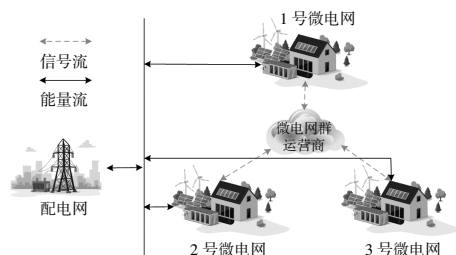


图 1 微电网群系统架构

Fig.1 Structure of microgrid cluster

1.2 信用机制

MG 作为理性行为人, 能够根据现实场景做出利益最大化的选择。不完善的群内交易机制存在交易漏洞, MG 能够通过上报虚假交易信息获得更大收益, 严重影响微电网群内交易的公平性和稳定性^[7]。

本文认为新能源和负荷的预测值较精确, 产生的误差较小; 而人为上报虚假信息作为一种主观失信行为, 会造成较大误差。为了抑制 MG 上报虚假信息, 同时避免因预测值误差而造成误判, 本文引入以上报电量为基准的诚信因子。当 MG 参与群内交易的实际电量超过上报电量波动范围时, 该 MG 将被记录一次不诚信交易行为。若实际缺电量大于上报需求量, 少报的缺电量以该时段配电网售电电价计算; 若实际缺电量小于上报需求量, MGCO 将通过调整该 MG 诚信因子的手段, 避免微电网群的损失。若实际售电量大于上报量, 少报的余电以该时段上网电价计算; 若实际余电量小于上报量, MGCO 将通过调整该 MG 诚信因子的手段, 避免微电网群的损失。诚信因子的大小受诚信度影响, 在某一时段诚信度与实际交易电量的关系如图 2 所示。

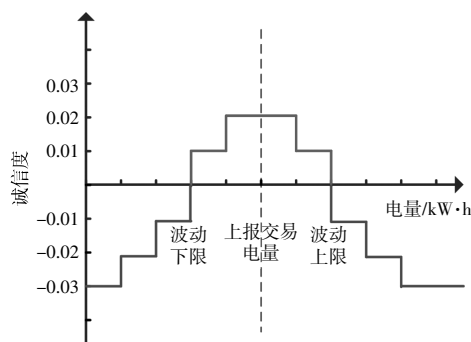


图 2 某时段 MG 交易情况与诚信度情况

Fig.2 Transaction and integrity of MG in a period

当 MG 运行在允许功率波动范围内时, MGCO 对其进行奖励, 提高其诚信因子; 反之, 降低其诚信因子。诚信因子与诚信度满足:

$$\begin{cases} \alpha_i^t = \alpha_i^{t-1} + \beta_i^t \\ \alpha_{\min} \leq \alpha_i^t \leq \alpha_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_i^t 为 MG i 在 t 时段的诚信因子; β_i^t 为 MG i 在 t 时段的诚信度; $\alpha_{\min}, \alpha_{\max}$ 分别为诚信因子下限、上限。

各 MG 初始诚信因子 α_i^0 均为 1, 即满足 $\alpha_i^0=1$ 。

在调度完成后, MGCO 按照诚信原则对诚信参与群内交易的 MG 进行诚信奖励, 各 MG 的奖励收益受诚信次数的影响, 即满足:

$$C_{i,aw} = \frac{F_i}{nT_n} C_{aw} + \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{n} C_{aw} - \frac{F_j}{nT_n} C_{aw} \right) \quad (2)$$

式中: $C_{i,aw}$ 为 MG i 获得的诚信奖励收益; F_i 和 F_j 分别为 MG i 和 MG j 在一个交易周期中的诚信交易次数; C_{aw} 为奖励收益总额; n 为参与群内交易的 MG 个数; T_n 为调度次数。

2 微电网群优化模型

2.1 单微电网能量调度

单微电网的能量调度以自身运行费用最低为目标, 对内部各装置出力情况进行优化调整。太阳能、风能等新能源出力成本忽略不计, 且优先满足自身供电^[18], 提高就地消纳能力。其目标函数为

$$\min C_{i,TC} = C_{i,ES} + C_{i,b} - C_{i,s} \quad (3)$$

式中: $C_{i,TC}$, $C_{i,ES}$, $C_{i,b}$, $C_{i,s}$ 分别为 MG i 的总运行费用、储能费用、购电费用、售电收益。

①储能装置: 其投资建造成本较大, 且随着储能装置的使用, 会出现储能装置老化等问题。故将储能装置的投资建造成本进行折算, 得到单位充放电成本 c_{ES} 。储能装置的充放电成本为

$$C_{i,ES} = \sum_{t=1}^{T_n} c_{ES} (P_{i,ch}^t + P_{i,deh}^t) \Delta t \quad (4)$$

式中: $P_{i,ch}^t$ 和 $P_{i,deh}^t$ 分别为 MG i 在 t 时段储能的充、放电功率; Δt 为调度时间间隔。

储能的充放电功率须在最大额定功率范围内, 且储能的充电和放电不能同时进行, 有:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,ch}^t \leq P_{i,ch,N} s_i^t \\ 0 \leq P_{i,deh}^t \leq P_{i,deh,N} (1 - s_i^t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{i,ch,N}$ 和 $P_{i,deh,N}$ 分别为储能充、放电的最大额定功率; s_i^t 为二进制变量, 限制储能充放电不能同时进行, 当 s_i^t 为 0 时, 储能可放电, 反之, 则充电。

为避免储能的过充过放, 设置储能剩余电量的上、下限值; 为避免因储能频繁的充放导致储能过早损坏, 设置调度周期内最大吞吐量, 即:

$$\begin{cases} S_{i,ES,\min} \leq S_{i,ES}^t \leq S_{i,ES,\max} \\ \sum_{t=1}^{T_n} (P_{i,ch}^t + P_{i,deh}^t) \Delta t \leq Q_{i,\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_{i,ES,\max}$ 和 $S_{i,ES,\min}$ 分别为储能剩余容量的最大值和最小值; $S_{i,ES}^t$ 为 MG i 储能在 t 时刻剩余容量; $Q_{i,\max}$ 为 MG i 储能日吞吐量上限, 其取值由交易电价和储能损耗等因素综合确定。

为了保证储能装置能够持续工作, 其调度周期始末的剩余容量应相等, 且储能装置在 t 时刻的剩余容量可根据 $t-1$ 时刻的剩余容量计算, 即:

$$\begin{cases} S_{i,ES}^0 = S_{i,ES}^{T_n} \\ S_{i,ES}^t = S_{i,ES}^{t-1} + P_{i,ch}^t \eta_{ch} \Delta t - \frac{P_{i,deh}^t}{\eta_{deh}} \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_{i,ES}^0$ 和 $S_{i,ES}^{T_n}$ 分别为储能调度周期始、末的剩余容量; η_{ch} 和 η_{deh} 分别为储能在充、放电时的传输效率。

②参与微电网群内交易: 在新能源出力低于负荷需求时, MG 可从 MGCO 购买电能, 以满足自身功率需求; 当新能源出力超过负荷需求时, 可向 MGCO 出售电能获取收益。MG 与 MGCO 的交易电能须在联络线允许的最大传输功率范围内交易, 即:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,b}^t \leq P_{i,\max} k_i^t \\ 0 \leq P_{i,s}^t \leq P_{i,\max} (1 - k_i^t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{i,b}^t$ 和 $P_{i,s}^t$ 分别为 MG i 在 t 时段购、售电功率; $P_{i,\max}$ 为 MG i 联络线上的功率上限; k_i^t 为购电标志位, 其为二进制数, 保证了 MG i 不能同时购电和售电, 当 k_i^t 为 1 时, MG 购电, 反之, 则售电。

MG 参与微电网群内交易, 其购售电成本为

$$\begin{cases} C_{i,b} = \sum_{t=1}^{T_n} I_{i,b}^t P_{i,b}^t \Delta t \\ C_{i,s} = \sum_{t=1}^{T_n} I_{i,s}^t P_{i,s}^t \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

式中: $I_{i,b}^t$, $I_{i,s}^t$ 分别为 MG i 在 t 时段参与群内交易时的购电、售电电价。

③功率平衡: MG 通过调节储能的充放电功率参与微电网群内交易, 满足功率平衡, 即:

$$P'_{i,dch} + P'_{i,wt} + P'_{i,pv} + P'_{i,b} = P'_{i,ch} + P'_{i,load} + P'_{i,s} \quad (10)$$

式中: $P'_{i,wt}$ 为风机功率; $P'_{i,pv}$ 为光伏功率; $P'_{i,load}$ 为电力负荷。

2.2 MGCO 群内电能交易定价合约

MGCO 作为能量交易中心, 根据下层 MG 上报的各时刻的电能盈亏情况进行内部定价, 保证 MGCO 获利的基础上, 以微电网群整体的功率波动最低为目标。

因新能源出力存在不稳定等问题, 群内常发生新能源供需不平衡, 为满足群内供需, MGCO 须与配电网交易。为了调动 MG 参与群内交易的积极性, 群内交易电价应满足高于上网电价、低于配电网分时电价的原则, 即:

$$c'_s \leq I'_i \leq c'_b \quad (11)$$

式中: c'_s 为 t 时段配电网售电电价; c'_b 为 t 时段上网电价; I'_i 为 MG i 在 t 时段参与群内交易电价。

MG 在任意时段只能作为售电方或购电方, 其参与群内交易的电价满足:

$$\begin{cases} I'_i = I'_{i,b} + I'_{i,s} \\ c'_s v_i \leq I'_{i,s} \leq c'_b v_i \\ c'_s (1-v_i) \leq I'_{i,b} \leq c'_b (1-v_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中: v_i 为二进制变量, 当 v_i 为 1 时, MG i 在 t 时段售电, 反之, 则购电。

本文借鉴功率交互原则^[14]和定价原则^[16], 制定了一种根据诚信因子动态调整群内电价的定价机制。当群内售电需求小于购电需求时, 群内购售电电价满足:

$$\begin{cases} I'_{i,s} = \frac{\alpha'_i (c'_s + c'_b - m')}{2} \\ I'_{i,b} = \frac{\alpha'_i P'_{i,b} P'_s (c'_s + m' - 1) + 2c'_b P'_b P'_{i,b}}{2(P'_b)^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: m' 为 MGCO 协调群内电能交易的获利系数; P'_b 和 P'_s 分别为 t 时段群内具有缺额电能 MG 总的购电功率和具有盈余电能 MG 总的售电功率。

当群内售电需求大于购电需求时, 群内购售

电电价满足:

$$\begin{cases} I'_{i,b} = \frac{\alpha'_i (c'_s + c'_b + m')}{2} \\ I'_{i,s} = \frac{\alpha'_i P'_{i,s} P'_b (c'_s + m' - 1) + 2c'_s P'_s P'_{i,s}}{2(P'_b)^2} \end{cases} \quad (14)$$

为了保证 MG 的利益, MGCO 应在一定范围内对 m' 进行调节, 即:

$$m_{\min} \leq m' \leq m_{\max} \quad (15)$$

式中: m_{\max} 和 m_{\min} 分别为 m' 的上限、下限。

MGCO 作为微电网群内交易中心, 须承担一定的社会责任, 以微电网群的整体功率波动最小为目标, 即:

$$\begin{cases} P'_{bs} = \sum_{i=1}^n (P'_{i,b} - P'_{i,s}) \\ \min P'_f = \sum_{i=1}^{T-1} |P'_{bs}{}^{i+1} - P'_{bs}{}^i| \end{cases} \quad (16)$$

式中: P'_{bs} 为 t 时段微电网群整体与外部电网交易功率, 当 P'_{bs} 为正时, 微电网群从外网购电, 当 P'_{bs} 为负时, 微电网群向外网售电; P'_f 为微电网群整体的功率波动。

3 Stackelberg 博弈模型及求解

MGCO 在满足交易定价合约的前提下制定一天的交易电价策略集合, 各 MG 根据 MGCO 的交易电价方案, 实时调控每时段储能的充放电功率, 合理规划参与群内交易的电量。MGCO 与 MG 之间的交互变量为交易电价和交易功率。各 MG 能够根据群内交易电价, 动态调整参与群内交易的电量; MGCO 也会根据 MG 参与群内交易的电量调整交易电价。通过交易电价策略集合与交易电量集合的不断调整, 直至找到最优策略集合。MGCO 与 MG 的决策具有先后顺序, 可视为一个主从博弈模型, 该模型可表示为

$$G = \left\{ (MGCO \cup MG); I_{i,b}, I_{i,s}; P_{i,b}, P_{i,s}; P_f; C_{i,TC} \right\} \quad (17)$$

式中: MGCO \cup MG 表示 MGCO 和 MG 是博弈方; $I_{i,b}$ 和 $I_{i,s}$ 分别为 $I'_{i,b}$ 和 $I'_{i,s}$ 的集合; $P_{i,b}$ 和 $P_{i,s}$ 分别为 $P'_{i,b}$ 和 $P'_{i,s}$ 的集合。

博弈均衡须满足:

$$\begin{cases} P_f(I_{i,b}^*, I_{i,s}^*, P_{i,b}^*, P_{i,s}^*) \leq P_f(I_{i,b}, I_{i,s}, P_{i,b}, P_{i,s}) \\ P_f(I_{i,b}^*, I_{i,s}^*, P_{i,b}^*, P_{i,s}^*) \leq P_f(I_{i,b}, I_{i,s}, P_{i,b}, P_{i,s}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $(I_{i,b}^*, I_{i,s}^*, P_{i,b}^*, P_{i,s}^*)$ 为博弈均衡策略集合。

该策略集合是非空的、有界的子集,且目标函数是连续的,存在均衡解。

本文采用列和约束生成算法,将模型分解为主问题和子问题交替求解^[9],其中,主问题是 MG 自治优化问题,子问题是 MGCO 协调群内电价降低微电网群功率波动问题,利用 MATLAB 中 YALMIP 工具箱调用 SCIP 对该模型进行求解。求解流程如图 3 所示。

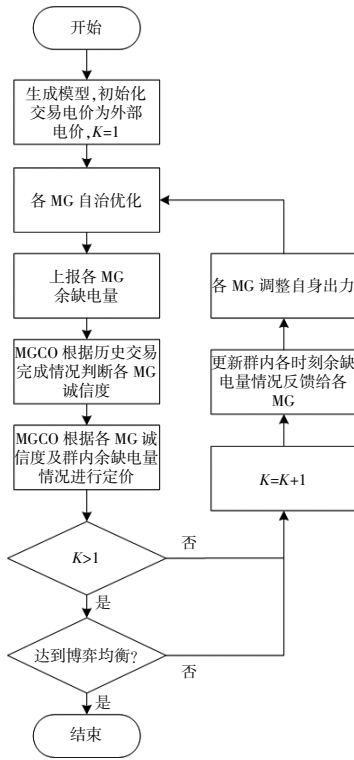


图 3 求解流程图

Fig.3 Flow chart of optimization

4 算例分析

本文以某 3 个工业园区微电网为例,由 MGCO 作为领导者组成微电网群,分析其群内交易策略,其中调度时间间隔为 1 h,调度周期为 24 h。3 个工业园区电费为工业电费,每个园区均配有储能、光伏发电系统和风机机组等设备,设备的基本参数信息参照表 1,配电网电价参照表 2,各 MG 风机、光伏的出力预测和负荷的功率预测见图 4。

表 1 MG 中设备的各项参数

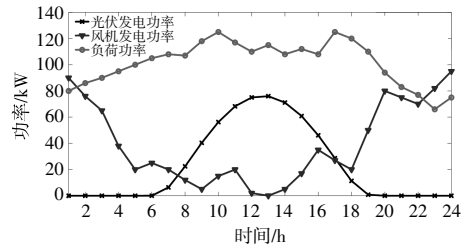
Table 1 The parameters of the equipment in MG

设备名称	参数	MG1	MG2	MG3
储能设备	最大容量/kW·h	285	240	0
	最小剩余容量/kW·h	40	30	20
	最大充电功率/kW	50	25	20
	最小充电功率/kW	50	25	20
联络线	单位运行维护费用/元·(kW·h) ⁻¹	0.3	0.3	0.3
	最大允许功率/kW	80	70	60

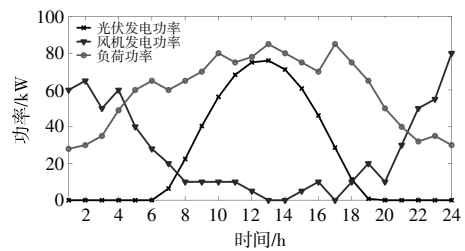
表 2 电网分时电价

Table 2 Time-of-use electricity price of grid

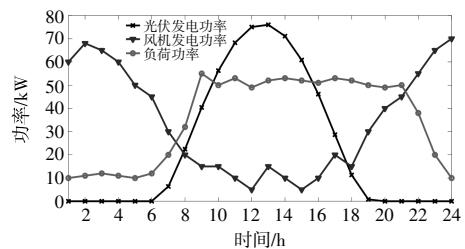
峰谷时段	分时电价 元/kW·h	上网电价 元/kW·h	时段
峰时段	1.241	0.90	9:00-12:00, 16:00-20:00
平时段	0.779	0.50	8:00-9:00,12:00- 16:00,20:00-23:00
谷时段	0.488	0.30	00:00-8:00, 23:00-24:00



(a)MG1



(b)MG2



(c)MG3

图 4 各 MG 风机、光伏和负荷的功率预测曲线

Fig.4 Power curves of WT, PV and load in each MG

4.1 微电网群能量管理分析

为了分析本文提出的微电网群内交易模式的

有效性,首先对不存在虚假信息的两种交易方案进行对比。方案1:各MG独立运行;方案2:本文提出的交易方式。利用MATLAB进行仿真,得到两种方案运行情况的对比结果,具体数据如表3所示。

表3 各方案运行情况对比

Table 3 Comparison of the operation of each scheme 元

方案	MG	储能成本	购电成本	售电收益	过网费	总费用
1	1	124.31	640.53	0	0	764.84
	2	71.94	244.16	36.37	0	279.73
	3	33.22	10.93	237.23	0	-193.08
	合计	229.47	895.62	283.60	0	851.49
2	1	124.31	605.02	0	5.97	735.30
	2	65.64	243.62	39.09	1.62	271.79
	3	50.59	10.93	292.71	6.54	-224.65
	合计	240.54	859.57	331.80	14.13	782.44

由表3数据可知,与方案1相比,方案2中MG1和MG2总费用分别降低了29.54元和7.94元,MG3收益增加了31.57元,微电网群整体费用减少了8.11%。MG1的购电成本减少了35.51元,售电收益不变;MG2购电成本减少了0.54元,售电收益增加了2.72元;MG3购电成本不变,售电收益增加了55.48元。这是由于MG1存在大量的缺额电能,MG3存在大量的盈余电能,能够更积极地参与群内交易,致使MG1购电成本减少,MG3售电收益提高。通过比较,MG参与微电网群交易能够降低其运行费用,且交易量越多,成本下降幅度越大,实现了MG经济运行,调动了MG参与群内交易的积极性。

图5和图6分别为方案1和方案2两种交易模式的MG储能充放电情况。图中正、负功率分别表示储能充、放电功率。通过比较可知,MG1在3-4,8,10-12,18和20时段对储能充放电功率进行了调整,MG2在3和10时段对储能进行了调整,

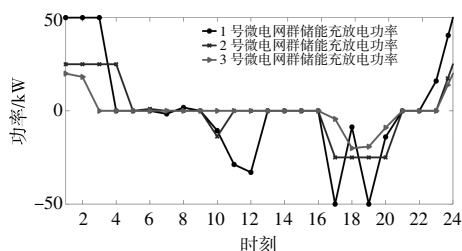


图5 方案1下MG储能充放电情况

Fig.5 Charge and discharge of MG energy storage under scheme 1

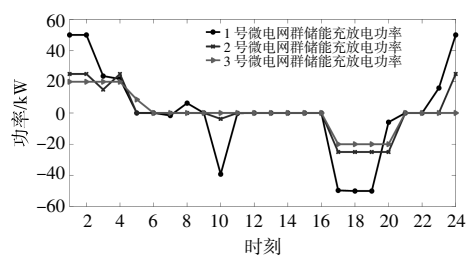


图6 方案2下MG储能充放电情况

Fig.6 Charge and discharge of MG energy storage under scheme 2

MG3在2-5,17,20和24时段对储能充放电功率进行了调整。结合表3可以看出:MG1和MG2储能总吞吐量变动较小;在储能最大吞吐量限制条件下,MG3总的吞吐量上升,储能设备能够更限度地被利用,同时保证了储能装置的使用寿命。

图7中比较了两种交易方案的微电网群整体功率波动情况。

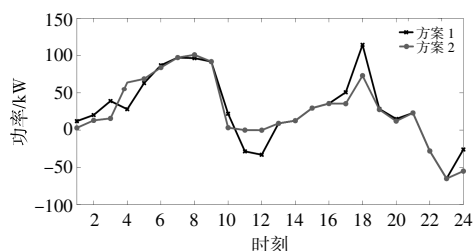


图7 微电网群整体功率波动情况

Fig.7 Power fluctuation of microgrid cluster

图7中,正负功率分别表示微电网群从外部购售电的功率。由图7可知,两种交易方案下,以方案2交易方式运行时,在9-13时段和17-19时段峰值功率波动更加平缓,起到削峰填谷、平缓负荷的作用。

为验证均衡电价的合理性,以各时段配电网电价为参照,群内各时段交易电价如图8所示。

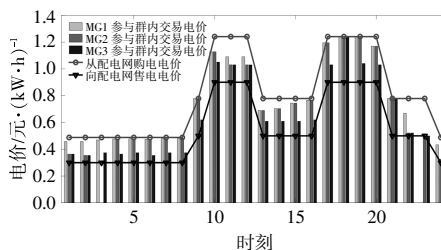


图8 群内交易电价与配电网电价对比

Fig.8 Comparison of the trading price of electricity within the cluster and the distribution network

图8中:根据电价机制可知,18,19和21时段,群内MG均没有盈余电能,该时段内交易电价

等于配电网分时电价;在 23 时,群内 MG 无缺电,该时段的售电电价等于上网电价。各时段交易电价均处于配电网上网电价和分时电价之间,能够调动 MG 参与群内交易的积极性,验证了该群内定价机制的合理性和有效性。

4.2 虚假信息环境下微电网群交易情况分析

为了验证本文交易方案具有抑制人为上报虚假信息的作用,设置运行方案 3 进行对比。方案 3:文献[14]提出的合作博弈方式下微电网群的交易策略。

为分析虚假信息对两种方案的影响,应先得到真实信息下两种方案的运行情况。对于存在虚假信息时的优化运行情况,两种方案上报虚假信息方均为 MG1。基于光伏、风机和负荷的预测值进行优化,得到方案 2 和方案 3 存在虚假信息的情况,详细数据见表 4 和表 5。方案 2 真实信息下的运行情况如表 3 所示。

表 4 虚假信息对方案 2 交易策略的影响

Table 4 The influence of false information on scheme 2 trading strategy 元

MG	储能成本	购电成本	售电利润	过网费	总费用
1	124.31	619.59	0	6.10	750.00
2	65.64	244.19	39.10	1.49	272.22
3	50.59	10.93	292.71	6.54	-224.65
合计	240.54	874.71	331.81	14.13	797.57

表 5 方案 3 运行情况

Table 5 Scheme 3 operation 元

是否存在虚假信息	MG	储能成本	交易费用	总费用
否	1	124.31	603.99	728.30
	2	71.94	202.64	274.58
	3	33.22	-266.75	-233.53
	合计	229.47	539.88	769.35
是	1	124.31	582.87	707.18
	2	71.94	212.90	284.84
	3	33.22	-255.88	-222.66
	合计	229.47	539.89	769.36

由表 5 可知,微电网群在方案 3 运行下,当存在上报虚假购售交易量信息时,会影响各 MG 运行的经济性。MG1 为虚假信息上报方,通过上报虚假购售电量,其运行费用减少了 21.12 元;MG2 和 MG3 为上报真实交易信息方,运行费用分别增加了 10.26 元和 10.87 元。由表 3 和表 4 对比可知:方案 2 运行时,上报虚假信息方 MG1 的运行费用增加了 14.70 元,这不符合通过上报虚假信息

息降低运行费用的目的,一定程度上抑制了人为上报虚假信息的产生;其他 MG 运行费用变动不大,MG2 运行费用仅增长了 0.43 元,MG3 运行费用不变。虽然在真实交易信息下方方案 3 的运行费用要优于方案 2,但是当存在上报虚假交易信息时,将会损害其他诚信 MG 的利益。这种情况若长期不能解决,必将引起群内交易混乱,影响微电网群长远发展。由以上对比分析可知,方案 2 能够避免上报虚假信息的一方获利,同时降低了对上报真实交易信息方经济运行的影响,保证交易完成。加入诚信奖励机制后,各 MG 运行情况如表 6 所示。

表 6 诚信奖励机制下各 MG 运行情况

Table 6 The operation of each MG under the credit reward mechanism 元

是否存在虚假信息	MG	奖励收益	总费用
否	1	4.89	730.41
	2	4.89	266.90
	3	4.89	-229.54
	合计	14.67	767.77
是	1	1.00	749.00
	2	8.53	263.69
	3	8.53	-233.18
	合计	18.06	779.51

由表 6 可知,加入诚信奖励机制后,存在虚假信息与无虚假信息情况相比,上报虚假信息的 MG1 运行费用增加了 18.59 元,MG2 运行费用下降了 3.21 元,MG3 利润增加了 3.64 元。因此,加入诚信奖励机制后,能够更好地激励诚信 MG,惩罚上报虚假交易信息的 MG,抑制人为上报虚假信息的可能性。

5 结论

本文以抑制人为上报虚假信息为目的,对微电网群内交易机制进行研究,并对上报虚假信息的影响进行了详细的分析。通过与 MG 单独运行方案以及存在虚假信息情况的对比,得到如下结论。

①通过构建合理的定价合约机制,能够有效减少人为上报虚假信息的可能性,保证了交互信息的真实性,有利于微电网群内的优化运行。

②以上报电量为基准,设置诚信惩罚机制,通过调节诚信因子,减少 MG 违约行为的产生,保证各 MG 按照上报结果完成调度。

参考文献:

- [1] 陈昆,尚龙龙,罗金阁,等.基于“风-光-储”测量数据融合的孤岛微电网一次调频参数优化模型[J].可再生能源,2022,40(3):383-388.
- [2] 李现宝,张可.基于改进和声搜索算法的微电网优化调度研究[J].东北电力大学学报,2022,42(5):83-89.
- [3] Han Y, Zhang K, Li H, et al. MAS-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: a comprehensive overview [J].IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(8):6488-6508.
- [4] 徐海华,陈辉,杨尚东,等.基于博弈的多楼宇微网系统滚动调控方法[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(4):83-91.
- [5] 陈玥,刘锋,魏韡,等.需求侧能量共享:概念、机制与展望[J].电力系统自动化,2021,45(2):1-11.
- [6] 帅轩越,马志程,王秀丽,等.基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J].电网技术,2023,47(2):679-690.
- [7] 胡蓉,魏震波,郭毅,等.现货市场下计及用户需求响应弹性差异的微电网优化运营分析[J].高电压技术,2022,48(4):1393-1402.
- [8] 王瑞,程杉,刘焯,等.基于综合需求响应和奖惩阶梯碳交易的能源枢纽主从博弈优化调度[J].电力系统保护与控制,2022,50(8):75-85.
- [9] 芮涛,李国丽,胡存刚,等.考虑电价机制的微电网群主从博弈优化方法[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2535-2546.
- [10] 胡晓通,刘天琪,刘舒,等.基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化运行[J].电力自动化设备,2016,36(3):33-40.
- [11] 李军祥,王宇倩,何建佳,等.基于区块链的微电网电力市场电价与电量动态博弈[J].电力系统自动化,2021,45(17):11-19.
- [12] 王乐乐,陈佳佳,焦丕华,等.考虑非线性奖惩机制的多主体主从博弈模型[J].控制理论与应用,2021,38(12):2010-2018.
- [13] 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.
- [14] 林宗岱,赵波,李春燕,等.SoS架构下计及虚假信息的多微电网经济调度[J].电力系统自动化,2020,44(16):37-44.
- [15] 何浩,雷霞,黄涛,等.价格引导下多微网系统协调自治优化运行策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(16):17-26.
- [16] 黄弦超,封钰,丁肇豪.多微网多时间尺度交易机制设计和交易策略优化[J].电力系统自动化,2020,44(24):77-88.
- [17] 宋尚逾.风险环境下多微电网协调运行优化方法研究[D].济南:山东大学,2021.
- [18] 马一鸣,周夕然,董鹤楠,等.考虑电转气与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度[J].电网与清洁能源,2021,37(8):118-127,138.
- [19] 冯紫妍,许仪勋,汪凯琳,等.考虑寿命损耗的微电网电池储能容量优化配置[J].电源学报,2024,22(1):101-109.

Research on suppressing false information in micro-grid transactions with Stackelberg game based on dynamic integrity factor

Zhang Ying, Wang Jinghua, Chen Wengang, Chen Jiajia, Xu Bingyin, Yin Wenliang
(Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to suppress the false information existing in the interactive information between microgrid (MG) and microgrid cluster operator (MGCO), a trading mechanism with the Stackelberg game is proposed, and a dynamic integrity factor is used to consider the honesty behavior of the MG. Firstly, a reward and punishment mechanism based on the reported electricity quantity and the actual trading quantity is established. Transaction price can be adjusted by credit factor. Secondly, a Stackelberg game model with MGCO as leader and MGs as followers is developed. The upper level minimizes fluctuation of power for microgrid cluster, where a contract mechanism of transaction is established to adjust basic transaction prices within the cluster. In the lower level, the cost of MG operation is minimized. Each MG acts as the follower responding to the day-ahead trading price and decides the electricity of exchange power with MGCO. Finally, the study prove that the presented transaction mechanism effectively suppresses the false information.

Keywords: microgrid cluster; false information; bi-layer optimization; Stackelberg game; incentive mechanisms