

电力市场环境下基于改进纳什议价方法的多微网能源交易机制设计

帅轩越¹, 王秀丽¹, 原晟淇¹, 陈果¹, 黄屹俊²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国网上海市电力公司, 200122, 上海)

摘要: 为设计一套科学合理的多微网间能源交易机制, 针对多微网交易过程中难以体现交易市场竞争程度与利益分配不合理两个问题, 提出了一种基于改进纳什议价方法的多微网交易机制。建立微网内各单元运行模型与收益模型, 考虑到各微网间能够进行电能交易, 实现微网群内能源互补, 提出多微网间动态电价模型, 构建多微网市场交易模型; 以微网群整体收益最大为目标, 建立多微网合作运行模型, 以各微网非合作博弈下的运行收益作为谈判崩裂点, 利用改进纳什议价方法对各微网的收益进行分配。对比分析了各微网在独立运行、非合作博弈以及合作博弈共3种模式下的结果, 以验证所提方法能够维持每个微网参与合作的积极性。以4个微网为算例, 在MATLAB平台上利用Yalmip工具与IPOPT求解器分别进行建模与仿真。结果表明: 所提的多微网能源交易模型能反映微网间交易的竞争程度, 相比各微网独立运行, 微网群的总收益提高了766.98元, 同时与主网间的交互电量减少了153.08 kW·h; 相比各微网处于非合作博弈模式, 所提出的分配方法使得4个微网的收益分别提高了1.07%、0.76%、0.66%、0.88%, 能够鼓励各微网参与合作。

关键词: 多微网; 电力市场; 能源交易; 非合作博弈; 合作博弈; 动态电价; 纳什议价

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202111011 **文章编号:** 0253-987X(2021)11-0097-09



OSID 码

Design of Multi-Microgrid Energy Trading Mechanism Based on Improved Nash Bargaining Method in Electricity Market Environment

SHUAI Xuanyue¹, WANG Xiuli¹, YUAN Shengqi¹, CHEN Guo¹, HUANG Yijun²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: It is necessary to design a scientific and reasonable energy trading mechanism between multiple microgrids. In view of the two issues of the imperfect reflection of the degree of competition in the trading market and the unreasonable benefit distribution in the process of multi-microgrid transactions, a multi-microgrid transaction mechanism based on improved Nash bargaining method is proposed, and the operating model and profit model of each unit in a microgrid are constructed. Considering that electricity can be traded between each microgrid to realize energy complementation among the microgrids, a dynamic electricity price model among multiple microgrids is proposed, and then a multi-microgrid market transaction model is established. The results show that the proposed multi-microgrid energy transaction model can reflect the degree of competition between microgrids. With the goal of maximizing the overall

profit of the microgrids, a multi-microgrid cooperative operation model is suggested, and the operating profit of each microgrid under the non-cooperative game is regarded as the point of negotiation breaking point, then Nash bargaining method is used to distribute the profit of each microgrid. The results of the three modes of independent operation, non-cooperative game and cooperative game of each microgrid are compared and analyzed to verify that the proposed method can maintain the enthusiasm of each microgrid to participate in cooperation. Taking four microgrids as an example, the Yalmip tool and IPOPT solver are used for modelling and simulating on MATLAB platform. Compared with the independent operation of each microgrid, the total profit of the microgrids increases by 766.98 yuan, and the interaction electricity with the main network reduces by 153.08 kW · h. Compared with all microgrids in non-cooperative game mode, the proposed distribution method increases the profit of the four microgrids by 1.07%, 0.76%, 0.66%, and 0.88% respectively, which encourages each microgrid to participate in the cooperation.

Keywords: multi-microgrid; electricity market; energy transaction; non-cooperative game; cooperative game; dynamic electricity price; Nash bargaining

微网(MG)技术能有效解决大规模分布式电源并网,减少对电网运行带来的冲击,逐渐成为未来能源关键技术之一^[1]。然而,传统独立式微网调节能力有限,无法对可再生能源进一步消纳^[2]。多微网技术^[3-5]可实现微网间的能源互补利用,在提高可再生能源消纳率^[6]、降低系统运行成本^[7]、减少对主网的功率交互^[8]、增添系统备用容量^[9]等方面均有显著优势。由于微网内光伏装置^[10-11]、储能设备^[12]、灵活负荷^[13]的作用,微网表现出源荷二重性,可参与电力市场中的能源交易。但是,多个微网参与电力市场交易会面临竞争博弈、交易结算等问题,如何构建一套科学合理的多微网能源交易机制已成为多微网能源市场的热点。迄今为止,已有诸多学者在博弈论的框架下对多微网系统展开研究,主要可分为合作博弈^[14-17]与非合作博弈^[18-20]两类。

合作博弈中参与者通过签订强制性合约产生合作剩余,该方式侧重关注联盟整体的收益,本质上属于集中式优化。文献[14]从多微网合作的角度出发,建立了基于合作博弈的微电网群交易模型,将多个微网等效为一个大微网——微网联盟,利用 Shapley 值对各微网的收益进行分配,同时提高了微网联盟与各微网的收益,但是将多个微网等效为大微网欠缺对微网间的功率传输限制的考虑,同时未考虑储能装置的影响;文献[15]从多能源型微网的角度出发,对冷热电多微网系统的经济调度进行研究,充分考虑了储能电池、热电联产单元、余热锅炉等装置对多微网系统协同调度的影响,分析了多微网间通过互联能显著降低系统运行总成本;文献[16-17]

在多种因素下考虑需求响应对多微网协同运行的影响,进一步探讨了需求响应能够有效减少系统运行成本,同时增加了可再生能源消纳率。需要指出的是,文献[15-17]旨在重点考虑如何提高联盟整体收益,后续仅需将联盟所得合作剩余按照特定分配方式进行分配(如 Shapley 值法),使得各微网收益相比独立运行得到提高即可满足合作博弈。

与合作博弈不同的是,非合作博弈能够反映多个个体之间的竞争关系,每个参与者力求自身利益最大。文献[18]基于非合作博弈建立了按比例分配的实时交易模型,设定了买方按竞价比例分配电能、卖方按售电量比例分配收益的交易模式。但是,当买方与卖方数量相差较大,比如少数买方与多数卖方进行交易时,会出现卖方由于获取收益少而不愿意参与交易,因此该模式下市场稳定性难以保障。文献[19]构建了基于非合作博弈的多能源枢纽优化运行模型,多能源枢纽通过内部电价交易有效减少了各自运行成本,提高了系统运行的灵活性;文献[20]针对多冷热电型的园区,建立了动态电价机制下多园区非合作博弈模型,相比各园区独立运行,在减少各园区运行成本、降低电网负荷峰谷差以及提高分布式可再生能源消纳率等方面均有显著改善。

然而,这些文献所研究的多微网协同交易运行模型无法反映交易竞争程度,多采用传统纳什议价方法与 Shapley 值分配方法。事实上,多微网协同运行下存在某些参与者牺牲自身利益来使得联盟收益最大,但对于这两种分配方法,这些参与者单独参与市场竞争可能会比参与合作时分配得到的收益多。本

文计及微网间交易过程中的竞争现象,综合考虑储能装置、可再生能源、切负荷、内部交易等因素,提出一种基于改进纳什议价方法下的多微网能源交易机制,以为多微网的能源交易问题提供参考。

1 多微网市场交易框架

1.1 市场交易情境分析

本文所述能源交易市场由电网、微网群交易中心以及微网群组成。微网不仅能与主网进行功率交互,也能参与微网间的能源交易。由于微网内含有可再生能源,其具有交易二重性:当微网内净功率大于 0 时,需向主网或其余微网购电,此时微网为购电微网;当微网内净功率小于 0 时,需向主网或其他微网售电,此时微网为售电微网;当微网内净功率等于 0 时,微网无需参与能源交易,此时微网为平衡微网。设购电微网、售电微网以及平衡微网的数量分别为 n_b 、 n_s 以及 n_e ,对市场交易情况进行分析:当 n_b 或 n_s 等于 0 时,市场内所有的微网均与主网进行交易;当 n_b 等于 1 时,市场中只有一个购电微网,微网间交易过程中仅有售电微网侧有竞争;当 n_s 等于 1 时,市场中只有一个售电微网,微网间交易过程中仅有购电微网侧有竞争;当 n_b 与 n_s 均大于 1 时,微网间交易过程中售电、购电微网侧均存在竞争。本文着重研究售电、购电微网侧均有竞争的情境,所研究的多微网能源交易框架如图 1 所示,图中 $T_1 \sim T_m$ 为变压器。

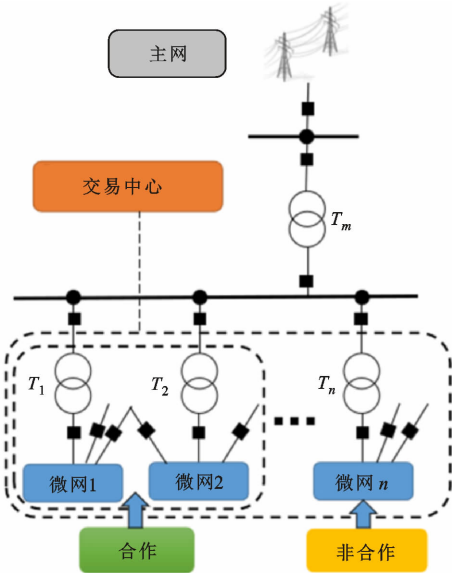


图 1 多微网能源交易框架

Fig. 1 Energy trading framework of multiple microgrids

1.2 内部交易电价模型

设一天分为 T 个时段,电网采取分时电价,且

电网侧的售电价高于购电价。微网群与主网进行功率交互会被价格套利,而微网群可通过设置微网间的购、售电价提高收益。考虑微网间电价设置的合理性,设置第三方对市场交易电价进行监管,一天中第 t 个时段电网侧与微网间的购、售电价应满足

$$\lambda'_{EG,b} \leq \lambda'_{in,b} < \lambda'_{in,s} \leq \lambda'_{EG,s} \tag{1}$$

式中: $\lambda'_{EG,b}$ 、 $\lambda'_{EG,s}$ 分别为电网侧的购、售电价; $\lambda'_{in,b}$ 、 $\lambda'_{in,s}$ 分别为微网间的购、售电价。

为反映微网间的博弈竞争关系,本文规定微网间的交易电价采用文献[20]中的动态电价机制。根据市场交易中买方与卖方的特性:当交易市场中购电总量较大时,微网间的购电价将上升;当交易市场中售电总量较大时,微网间的售电价将会下降。设微网总数为 n ,则一天中第 t 个时段微网的购、售电价可进一步表示为

$$\lambda'_{in,b} = a'_b \sum_{i \in n} |P'_{i,b}| + b'_b \tag{2}$$

$$\lambda'_{in,s} = a'_s \sum_{i \in n} |P'_{i,s}| + b'_s \tag{3}$$

式中: $P'_{i,b}$ 与 $P'_{i,s}$ 分别为微网 i 在一天中第 t 个时段与参与市场交易的微网的购电量与售电量; a'_b 、 b'_b 为微网间的购电价系数; a'_s 、 b'_s 分别为微网间的售电价系数。

结合式(1)~(3)可推出

$$b'_s = \lambda_{EG,s}; \quad b'_b = \lambda_{EG,b} \tag{4}$$

2 微网模型

假定微网由负荷、可再生能源、储能设备以及能源交易端组成,微网内部能流图如图 2 所示。

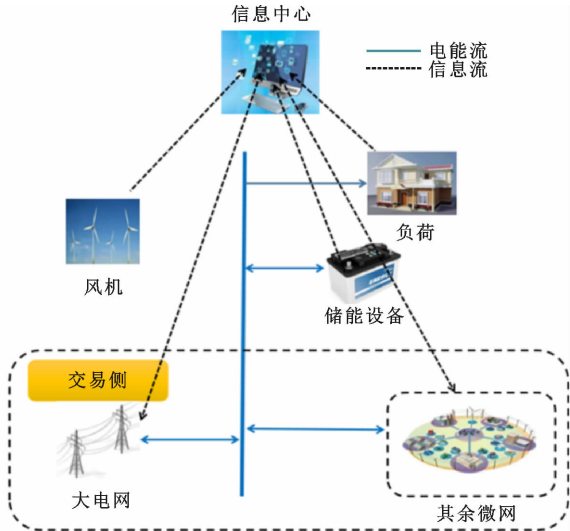


图 2 微网内部能流

Fig. 2 Internal energy flow diagram of microgrid

2.1 可再生能源

假定所有微网内可再生能源均为风机,风机依赖自然界中的风能进行发电,但大规模弃风导致微网可再生能源利用率下降。设一天中第 t 个时段微网 i 的风电补贴与弃风成本分别表示为

$$C_{i,\text{sub}}^t = \gamma_{\text{sub}} P_{i,\text{wt}}^t \Delta t \quad (5)$$

$$C_{i,\text{wt}}^t = \gamma_{\text{wt}} \max(P_{i,\text{wt}}^t - P_{i,\text{cg}}^t, 0) \Delta t \quad (6)$$

式中: γ_{sub} 与 γ_{wt} 分别为单位风电补贴与单位弃风成本; $P_{i,\text{wt}}^t$ 与 $P_{i,\text{cg}}^t$ 分别表示一天中第 t 个时段微网 i 风机的出力与并网功率; Δt 为研究时段,单位为小时。

2.2 储能设备

储能设备能实现电能的时空转移,假定所有微网的储能设备均为蓄电池。设一天中第 t 个时段微网 i 的蓄电池使用成本为

$$C_{i,\text{es}}^t = \gamma_{\text{es}} [\alpha_{\text{es}} P_{i,\text{esc}}^t + (1 - \alpha_{\text{es}}) P_{i,\text{esd}}^t] \Delta t \quad (7)$$

式中: γ_{es} 为蓄电池单位充放电维护成本; $P_{i,\text{esc}}^t$ 、 $P_{i,\text{esd}}^t$ 分别为一天中第 t 个时段微网 i 蓄电池的充、放电功率; α_{es} 为布尔变量,充电时取 1,放电时取 0。

一天中第 $t+1$ 个时段微网 i 蓄电池的容量为

$$E_{i,\text{es}}^{t+1} = E_{i,\text{es}}^t + [\alpha_{\text{es}} P_{i,\text{esc}}^t \eta_{\text{c}} + (1 - \alpha_{\text{es}}) P_{i,\text{esd}}^t / \eta_{\text{d}}] \Delta t \quad (8)$$

式中 η_{c} 、 η_{d} 分别为微网中蓄电池的充、放电效率。

为了维持蓄电池的使用寿命,设置如下约束

$$E_{i,\text{es}}^{\min} \leq E_{i,\text{es}}^t \leq E_{i,\text{es}}^{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{i,\text{esd}}^t \leq P_{i,\text{esd}}^{\max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{i,\text{esc}}^t \leq P_{i,\text{esc}}^{\max} \quad (11)$$

式中: $E_{i,\text{es}}^{\max}$ 、 $E_{i,\text{es}}^{\min}$ 、 $P_{i,\text{esc}}^{\max}$ 、 $P_{i,\text{esd}}^{\max}$ 分别为微网 i 蓄电池的容量上下限与充、放电上限。

2.3 切负荷

由于各微网内部没有发电机组,为了维护微网内部功率平衡,假定微网具有一定切负荷的能力。设第 t 个时段微网 i 的切负荷成本与相应约束为

$$C_{i,\text{cut}}^t = \gamma_{\text{cut}} P_{i,\text{cut}}^t \Delta t \quad (12)$$

$$0 \leq P_{i,\text{cut}}^t \leq P_{i,\text{cut}}^{\max} \quad (13)$$

式中 γ_{cut} 与 $P_{i,\text{cut}}^{\max}$ 分别为单位切负荷成本与允许切负荷的上限。

2.4 与主网功率交互

设第 t 个时段微网与主网交互功率为 $P_{i,\text{EG}}^t$,则第 t 个时段微网 i 与主网功率的交互成本与相应约束为

$$C_{i,\text{EG}}^t = \lambda_{\text{EG},\text{s}}^t \max(P_{i,\text{EG}}^t, 0) \Delta t + \lambda_{\text{EG},\text{b}}^t \min(P_{i,\text{EG}}^t, 0) \Delta t \quad (14)$$

$$-P_{i,\text{EG}}^{\max} \leq P_{i,\text{EG}}^t \leq P_{i,\text{EG}}^{\max} \quad (15)$$

式中 $P_{i,\text{EG}}^{\max}$ 为微网 i 与主网功率交互上限。

2.5 微网间功率交互

为防止微网价格套利,假定各微网一天中每时段购售方式由净功率决定。当一天中某时段净功率大于/小于/等于 0 时,认为该时段微网为购电/售电/平衡微网。设一天中第 t 个时段微网 i 与参与市场交易的微网的交易成本与相应约束为

$$C_{i,\text{MG}}^t = \lambda_{\text{in},\text{s}}^t P_{i,\text{b}}^t \Delta t - \lambda_{\text{in},\text{b}}^t P_{i,\text{s}}^t \Delta t \quad (16)$$

$$0 \leq P_{i,\text{b}}^t \leq P_{i,\text{b}}^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{i,\text{s}}^t \leq P_{i,\text{s}}^{\max} \quad (18)$$

$$P_{i,\text{b}}^t, P_{i,\text{s}}^t = 0 \quad (19)$$

式中 $P_{i,\text{b}}^{\max}$ 与 $P_{i,\text{s}}^{\max}$ 分别为微网 i 与参与市场交易的微网的购、售电上限。

3 基于改进纳什议价方法的多微网交易模型

传统纳什议价方法以各微网独立运行下的收益为谈判崩裂点,进一步对各微网的收益进行结算。但是,这种方法存在局限性:①未考虑各微网参与市场交易的情境;②某些微网单独参与市场竞争获得的收益可能比在传统纳什议价方法下分配得到的高。针对这两个问题,本文提出的改进纳什议价方法。

3.1 确定谈判崩裂点

当每个微网独立参与市场竞争时,目标函数为各自日运行收益最大,设第 i 个微网的目标函数为

$$\max C_i =$$

$$\sum_{t=1}^T (C_{i,\text{sub}}^t - C_{i,\text{wt}}^t - C_{i,\text{es}}^t - C_{i,\text{cut}}^t - C_{i,\text{EG}}^t - C_{i,\text{MG}}^t) \quad (20)$$

第 i 个微网的约束条件在式(1)~(3)(9)~(11)(13)(15)(17)~(19)的基础上,还应考虑各微网内部功率平衡与市场交易平衡

$$P_{i,\text{EG}}^t + P_{i,\text{cut}}^t + P_{i,\text{esc}}^t - P_{i,\text{esd}}^t + P_{i,\text{wt}}^t + P_{i,\text{b}}^t - P_{i,\text{s}}^t - P_{i,\text{e}}^t = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n C_{i,\text{MG}}^t = 0 \quad (22)$$

式(22)保证了各微网在每时段的交易费用平衡。

在目标函数与约束条件的基础上,多个微网间的交易竞争问题属于非合作博弈范畴,Nash 均衡解的存在性与唯一性证明见文献[20],该博弈问题具体描述如下。

(1)博弈参与者。博弈参与者为各个参与微网交易市场的交易商,表示为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

(2)策略集合。每个参与者的策略包括与其他微网的交易功率、主网的购售电量、储能设备出力以

及切负荷量。第 i 个参与者的策略表示为 s_i ,且满足相应的约束条件,各交易商通过调整策略使自身收益最大化。

(3)收益。第 i 个参与者在选择策略 s_i 时的收益 C_i ,见式(20)。

该博弈问题的求解流程如下。

步骤 1 输入系统的数据与信息,获取微网用户负荷与可再生能源预测曲线。

步骤 2 根据各微网的净负荷确定交易模式:当某时段净负荷大于 0,认为该时段交易商售电;当某时段净负荷小于 0,认为该时段交易商购电。

步骤 3 设定各微网间的购售电量初始值,确定各微网间的交易电价。

步骤 4 针对微网 i ,在第三方对市场交易电价的监管下(式(1)),利用内点法求解式(20)最大值下的策略 s_i^* ,保留最大收益值 C_i^* ,并更新当前策略。

步骤 5 在更新交易商 i 策略的基础上,与步骤 4 类似,依次求解所有交易商的最优策略与对应收益。若所有交易商的策略不再变化,输出所有交易商策略的 Nash 均衡解;否则,返回步骤 4。

3.2 基于合作博弈的改进纳什议价分配方法

当所有微网参与合作时,可运用合作博弈理论分析^[21],目标函数为所有微网运行收益总和最大。多个微网在优化总运行收益最大时,为实现整体目标函数最优,可能存在个别微网牺牲自身利益的现象。为此,需要进一步探讨一套科学合理的收益分配机制,维持各微网参与协同运行的积极性。本文提出改进纳什议价方法对各微网的运行收益进行分配,该方法能同时满足对称性、帕累托最优、独立与无关选择以及线性变换不变性共 4 个性质,以各微网独立参与市场交易的收益作为谈判崩裂点,所建立的模型具体表示为

$$\max \prod_{i=1}^n (C_i - C_i^0) \quad \text{s. t. } C_i \geq C_i^0 \quad (23)$$

式中 C_i^0 与 C_i 分别表示第 i 个微网在一个周期内独立参与市场交易的收益与议价后的运行收益。

考虑到式(23)为非凸非线性问题,利用文献[22]中的方法将其分解为两个凸的子问题,具体分解过程见本文首页 OSID 码中的开放科学数据与内容附录 A。分解后可利用 IPOPT 求解器进行求解,所分解的子问题依次为

$$\max \sum_{i=1}^n C_i \quad (24)$$

$$\max \sum_{i=1}^n \ln(C_i^* - C_i^0 + Z_i) \quad (25)$$

式中: C_i^* 为式(24)优化后第 i 个微网的运行收益; Z_i 为第 i 个微网的议价收益转移。

4 算例分析

以 4 个微网的场景作为算例进行仿真,每个微网配有风机与储能设备,各微网与主网相连,且每个微网间可通过联络线实现功率互传。各微网间、微网与主网间的功率交互极限分别为 100、150 kW;切负荷上限为 150 kW,切负荷成本为 0.8 元/kW;所有储能设备的额定容量为 300 kW·h,初始容量为 60 kW·h,充放电功率极限为 60 kW,允许容量上下限分别为 270、60 kW·h,单位充放电成本为 0.007 5 元/kW;购售电系数 a_s^i 、 a_b^i 分别取 -0.001 与 0.001 (元/kW)²。将一天 24 h 作为研究周期,电网一天内的电价如表 1 所示。每个微网一天中的风机出力、负荷预测曲线与净负荷曲线分别如图 3 和图 4 所示。

表 1 电网分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price of grid

时段	售电价/ (元·kW ⁻¹)	购电价/ (元·kW ⁻¹)
00:00~07:00 23:00~24:00	0.38	
08:00~10:00 16:00~18:00	0.85	0.35
11:00~15:00 18:00~22:00	1.32	

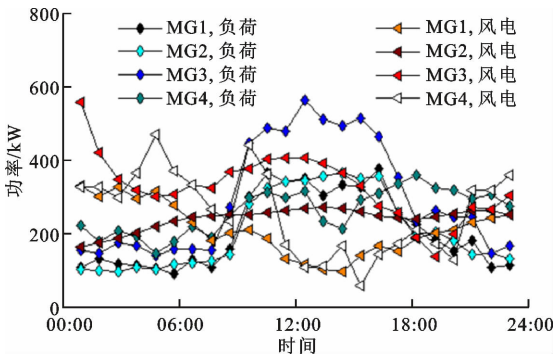


图 3 一天内各微网风电与负荷预测曲线

Fig. 3 Wind power and load forecast curve of each microgrid in one day

为了验证本文模型的有效性,设定 4 种模式进行对比分析:模式 1,所有微网内部不进行电能交

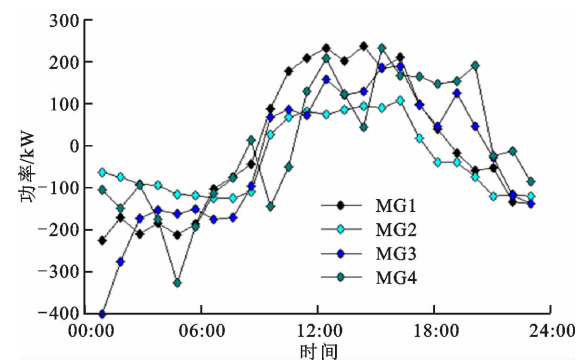


图 4 一天内各微网净负荷曲线

Fig. 4 Net load curve of each microgrid in one day

易;模式 2,各微网独立进行电能交易,不考虑微网间的合作现象;模式 3,所有微网进行合作博弈,采用传统纳什议价方法进行分配;模式 4,本文所提基于合作博弈的改进纳什议价模型。

在 MATLAB 平台上进行仿真,模式 1~4 下的各微网的日运行优化收益如表 2 所示。

表 2 模式 1~4 下各微网日运行优化收益
Table 2 Daily operation optimization profit of each microgrid under mode 1 to mode 4

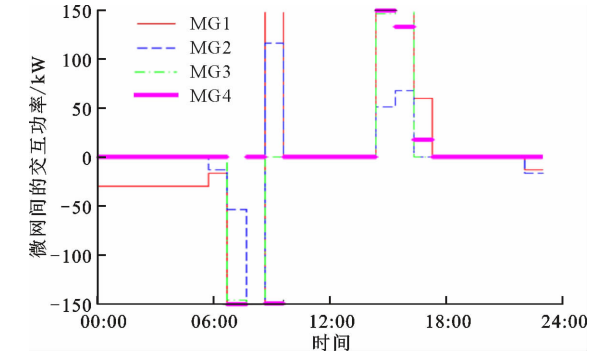
模式	日运行收益/元			
	MG1	MG2	MG3	MG4
1	3 511.85	4 972.87	5 699.31	4 272.73
2	3 782.45	5 091.64	5 938.05	4 411.60
3	3 741.20	5 202.22	5 928.66	4 502.08
4	3 820.06	5 129.25	5 975.66	4 449.21

通过表 2 可以发现:本文所构建的内部交易电价模型能有效提高各微网的运行收益;相比模式 1,模式 2 下微网群的总收益提高了 766.98 元。这是因为相比于模式 1 下直接与电网进行交易,模式 2 下买方微网与卖方微网通过内部电价进行交易均能使彼此获利。模式 3 下各微网协同合作提高了所有微网的总收益,但是并不一定所有微网均会参与合作,相比于独立参与市场竞争(模式 2),MG2 与 MG4 的收益分别提高了 2.17%与 2.05%,而 MG1 与 MG3 的收益分别减少了 1.09%与 0.16%,从而导致 MG1 与 MG3 更倾向于独立参与市场竞争,破坏了微网群合作的积极性。本文所提出的改进纳什议价分配方法(模式 4)使得每个 MG 的收益相比各微网独立参与市场交易的情况均提高了 37.61 元,这与纳什议价理论的数学推导一致,进一步验证了所提方法的有效性。对于每个微网,MG1~MG4 的收益分别提高了 1.07%、0.76%、0.66%、0.88%,有

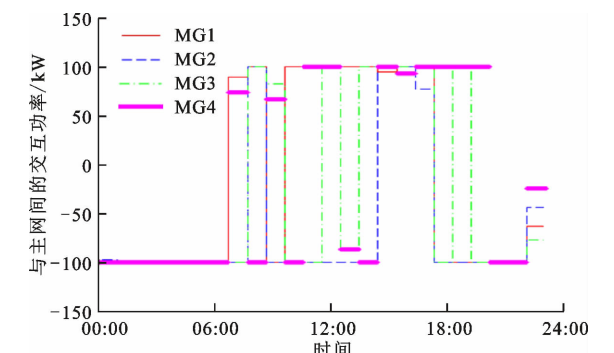
利于维持微网群进行长期合作。

模式 2 下一天中各微网间的交互功率、与电网交互功率、储能设备出力以及切负荷优化结果如图 5 所示。

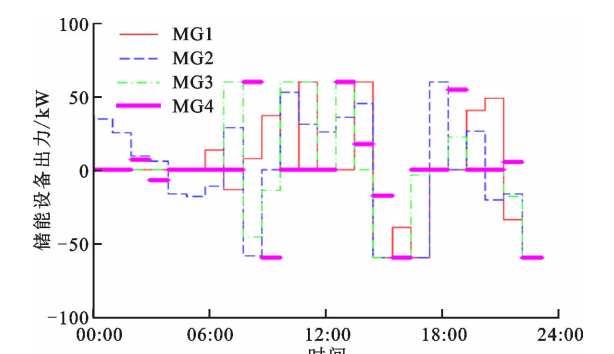
以图 5 的 MG1 为例进行分析,其他微网同理。MG1 在一天内 00:00~09:00 余电,表现为售电微网。因此,在该时段参与微网内部售电,但由于内部电价的约束限制,MG1 在一天内 00:00~06:00 时段售电量受限,所以 MG1 在该时段也向电网售电。在一天内 09:00~10:00 与 15:00~18:00, MG1 净功率大于 0,表现为购电微网,因此在该时段 MG1 从其他微网和电网进行购电。MG1 在一天内 20:00 之后再次表现为余电,向其他微网与主网售电。MG1 在一天内 06:00~11:00 与 14:00~23:00 使



(a)微网间交互功率



(b)与主网间的交互功率



(c)储能设备出力

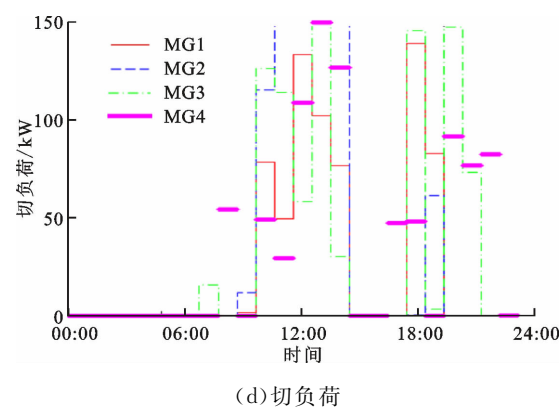


图 5 模式 2 下一天内各微网的优化运行曲线

Fig. 5 Optimized operation curve of each microgrid in one day under mode 2

用了储能设备,这是因为对于 MG1,相比于其他调度方式带来的收益,使用储能设备性价比较高。具体而言, MG1 在综合考虑一天内分时电价、动态交易电价以及其他设备的出力费用等因素下,在净负荷小于 0(即余电时段)进行充电,而在净负荷大于 0(即缺电时段)进行放电。MG1 在一天内 10:00~15:00 与 17:00~19:00 发生了切负荷,这是由于在一天内 10:00~19:00 中, MG1 的净负荷水平较高,仅依靠从主网购电或微网内部设备调度优化仍然不能避免切负荷,而 MG1 参与电力市场交易的博弈下在 15:00~17:00 通过与其他微网交易获得电能,从而有效避免切负荷现象。

模式 2 下一天中内部购售电价优化结果如图 6 所示。由图 6 可知:内部售电价在一天中 16:00~18:00 与电网购电价相同,这说明该时段下售电微网竞争最为激烈,售电微网的总售电量达到饱和;内部购电价在一天中 8:00~9:00 与电网售电价相同,这说明该时段下购电微网竞争最为激烈,购电微网的总购电量达到饱和。

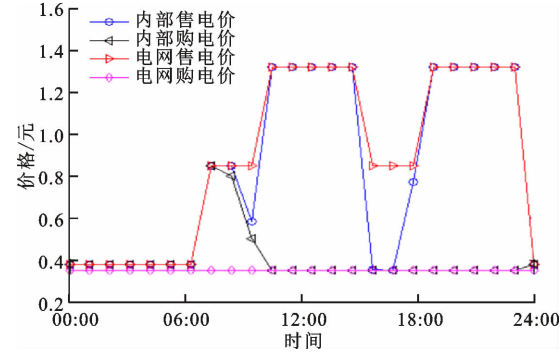


图 6 模式 2 下一天内的内部电价优化结果

Fig. 6 Optimized results of internal electricity prices in one day under mode 2

模式 1 与模式 2 下微网群与主网的交互电量曲线如图 7 所示。

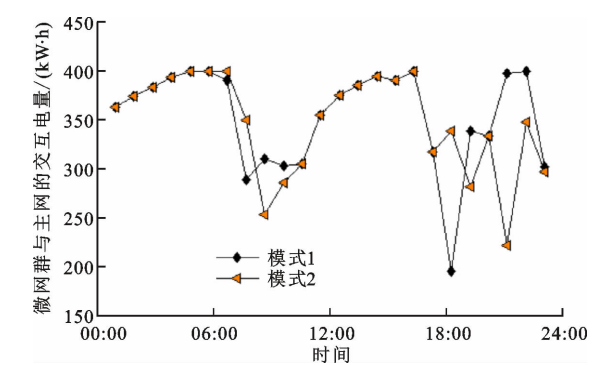


图 7 模式 1 与模式 2 下一天内微网群与主网的交互电量

Fig. 7 Interactive power of the microgrids and the main network in one day under mode 1 and mode 2

由图 7 可知:模式 1 与模式 2 下一天内微网群与主网的交互电量总计分别为 8 500.66 kW·h 与 8 347.58 kW·h。相比各微网独立运行(模式 1),所提的多微网内部电能交易模型(模式 2)能够减少与主网间的交易电量 153.08 kW·h,减少了对主网的影响。这是因为模式 2 下引入了微网间的交易机制,由于微网间的交易电价(动态电价)相比主网侧的购售电价更具吸引力,微网更倾向于参与微网间的电能交易,从而提高微网群的就地消纳能力,实现微网间的电能互补利用。

所有微网处于合作运行(模式 3 与模式 4)下各微网的最优策略见本文首页 OSID 码中的开放科学数据与内容附录 B,由于现有文献中针对多微网协同运行的结果分析较为完善,此处不再赘述。

5 结 论

本文针对电力市场环境下多微网能源交易问题,提出基于改进纳什议价方法的多微网交易模型,主要结论如下:

- (1)各微网通过内部电力交易(模式 2)能够有效提高各微网的运行收益,促进多微网系统就地消纳系统净电功率,减少与主网的功率交互;
- (2)所提的购、售动态电价模型能反映各微网参与市场的竞争程度,更贴合实际电力市场下的场景;
- (3)与非合作博弈(模式 2)和传统纳什议价方法(模式 3)两种情境下各微网的收益相比,所提的改进纳什议价模型(模式 4)能很好地权衡各个微网的收益,维持微网群长期合作的积极性;
- (4)本文仅考虑了微网间电能的交易,然而随着

电力市场的开放化,天然气、氢能等也会成为交易品,因此多能互补型微网间的多种能源交易机制将是下一个研究方向。

参考文献:

- [1] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等.含分布式发电系统的微网技术研究综述[J].电网技术,2009,33(9):14-18,34.
HUANG Wei, SUN Changhui, WU Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system [J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18, 34.
- [2] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等.能源互联网:驱动力、评述与展望[J].电网技术,2015,39(11):3005-3013.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013.
- [3] 茆美琴,丁勇,王杨洋,等.微网:未来能源互联网系统中的“有机细胞”[J].电力系统自动化,2017,41(19):1-11,45.
MAO Meiqin, DING Yong, WANG Yangyang, et al. Microgrid: an “organic cell” for future energy interconnection system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 1-11, 45.
- [4] 吴雄,王秀丽,崔强.考虑需求侧管理的微网经济优化运行[J].西安交通大学学报,2013,47(6):90-96.
WU Xiong, WANG Xiuli, CUI Qiang. Optimal operation of microgrid considering demand side management [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 90-96.
- [5] 贾星蓓,窦春霞,岳东,等.基于多代理系统的微电网多尺度能量管理[J].电工技术学报,2016,31(17):63-73.
JIA Xingbei, DOU Chunxia, YUE Dong, et al. Multiple-time-scales optimal energy management in microgrid system based on multi-agent-system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 63-73.
- [6] 赵毅,于继来.多微网智能配电系统协同自律运控模式初探[J].电网技术,2018,42(4):1200-1209.
ZHAO Yi, YU Jilai. Preliminary research on operation and control model of coordination and self-discipline for smart distribution system with multi microgrids [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1200-1209.
- [7] 张晓雪,牛焕娜,赵静翔.含微电网的配电网优化调度[J].电工技术学报,2017,32(7):165-173.
ZHANG Xiaoxue, NIU Huanna, ZHAO Jingxiang. Optimal dispatch method of distribution network with microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 165-173.
- [8] KHAN A A, NAEEM M, IQBAL M, et al. A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1664-1683.
- [9] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Enhancing power system resilience through hierarchical outage management in multi-microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2869-2879.
- [10] 索江镭,胡志坚,刘宇凯,等.大规模光伏发电并网对互联电力系统阻尼特性的影响及其阻尼控制策略[J].西安交通大学学报,2015,49(2):99-105.
SUO Jianglei, HU Zhijian, LIU Yukai, et al. Influence of large-scale photovoltaic system integration on damping characteristics of interconnected grid and damping control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 99-105.
- [11] 胡克用,胥芳,艾青林,等.适用于光伏多峰功率跟踪的改进型粒子群优化算法[J].西安交通大学学报,2015,49(4):140-148.
HU Keyong, XU Fang, AI Qinglin, et al. Improved particle swarm optimization for photovoltaic multi-peak power tracking [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 140-148.
- [12] 陈柏翰,冯伟,孙凯,等.冷热电联供系统多元储能及孤岛运行优化调度方法[J].电工技术学报,2019,34(15):3231-3243.
CHEN Pohan, FENG Wei, SUN Kai, et al. Multi-energy storage system and islanded optimal dispatch method of CCHP [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3231-3243.
- [13] 王兆杰,高峰,翟桥柱,等.高耗能企业关口平衡问题的双目标规划模型[J].西安交通大学学报,2013,47(8):26-32.
WANG Zhaojie, GAO Feng, ZHAI Qiaozhu, et al. A Bi-objective programming model for gateway balance problem in energy intensive enterprises [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(8): 26-32.
- [14] 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.
- [15] 徐青山, 李淋, 蔡霖霖, 等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 36-44.
- XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering power interaction among microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-44.
- [16] 刘洋, 艾欣, 胡鹏, 等. 考虑功率交互与需求响应的多微网经济调度 [J]. 现代电力, 2020, 37(6): 605-612.
- LIU Yang, AI Xin, HU Peng, et al. Economic scheduling of multi-microgrids considering power interaction and demand response [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(6): 605-612.
- [17] 方绍凤, 周任军, 许福鹿, 等. 考虑电热多种负荷综合需求响应的园区微网综合能源系统优化运行 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 50-57.
- FANG Shaofeng, ZHOU Renjun, XU Fulu, et al. Optimal operation of integrated energy system for park micro-grid considering comprehensive demand response of power and thermal loads [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(1): 50-57.
- [18] LIU Zifa, GAO Jianyu, YU Hanxiao, et al. Operation mechanism and strategies for transactive electricity market with multi-microgrid in grid-connected mode [J]. IEEE Access, 2020, 8: 79594-79603.
- [19] 魏春, 徐向志, 王国烽, 等. 基于非合作博弈的多能量枢纽优化运行方法 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 48-53, 60, 54.
- WEI Chun, XU Xiangzhi, WANG Guofeng, et al. Non-cooperative game-based optimal operation method of multiple energy hubs [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 48-53, 60, 54.
- [20] 吴福保, 刘晓峰, 孙谊嫔, 等. 基于冷热电联供的多元区博弈优化策略 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 68-75.
- WU Fubao, LIU Xiaofeng, SUN Yiqian, et al. Game optimization strategy for multiple parks based on combined cooling heating and power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 68-75.
- [21] YANG Chungang, LI Jiandong, TIAN Zhi. Optimal power control for cognitive radio networks under coupled interference constraints: a cooperative game-theoretic perspective [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1696-1706.
- [22] 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.

(编辑 陶晴)