

计入交易偏好的多微网电力系统纳什均衡分析^①

林 越^{1,2}, 孟祥玮³, 刘廷章¹, 王哲河², 黄 敏²

1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 海南热带海洋学院 海洋信息工程学院, 海南 三亚 572022;

3. 惠州市出入境检验检疫局, 广东 惠州 516006

摘要: 提出采用混合策略纳什均衡研究多微网系统交易的博弈模型及分析方法. 在给定模型假设下, 不仅考虑多电微网的电价报价、配电网的电价报价及服务报价对交易的影响, 同时重点讨论了博弈方各自的电量交易偏好. 以 3 个微网及配电网构成一个智能电网系统为例进行算例分析, 解释了混合策略纳什均衡在该系统中的实际意义, 最后研究了各参数对混合策略纳什均衡点的影响.

关 键 词: 偏好; 混合策略; 纳什均衡; 智能电网; 电力交易

中图分类号: TP274

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)10-0100-06

随着智能电网的发展, 分布式发电与微网技术在世界范围内也迅速发展, 分布式电源并网发电是智能电网发展的大势所趋^[1-3].

分布式发电与微网互联组成智能配电网系统. 若微网之间不存在(或不倾向)电量交易, 则可将单个微网视为一个分布式电源, 单向地接受智能配电网的统一运行和管理. 若只存在微网与配电网之间的双向电力交易, 不存在电力调度, 即所有的微网都只和智能配电网发生交易, 该模式称为纯微电网模式. 若微网之间存在电量交易, 称为松散的群模式^[4-7].

在电力市场研究领域, 关于多微网系统电量交易平衡问题一直是热点, 并已有很多研究成果. 文献[8]研究表明, 如有微电网参与电力调度, 不仅可让微网自身获得更大的经济利益, 又可帮助配电网改善负荷特性, 但多个微网间的调度问题具有非合作特性, 难以直接通过集中优化求解. 文献[9]假设各微网的功率富余和功率缺额为单位量, 采用非合作博弈的方法对松散的群模式下微电网之间交易的报价进行了研究并得出结论: 存在功率富余概率大的微电网可以提出更高的报价, 可获得更多的收益. 文献[10]提出多代理电力系统交易的多层结构, 仿真的结果表明该多层结构是可行有效的. 文献[11]基于博弈论的纳什均衡对松散的群模式交易进行了研究, 得到该系统存在纯策略纳什均衡点, 对应的博弈策略与配电网购电价格、配电网售电价格有关.

综上所述, 以上文献主要是针对纯策略下电力交易的研究, 并没有考虑它们的交易偏好. 由于分布式发电大部分来源于风、光、地热等清洁能源, 其均具有随机性、间歇性及不可控性等特征. 如果不考虑配电网的负荷特性, 微网不分时段地直接和配电网进行并网电量交易, 容易对配电网造成冲击, 甚至会酿成严重的后果. 如果不考虑配电网与微网的交易偏好去研究它们之间电量交易的均衡, 那对于配电网来说将是

① 收稿日期: 2016-11-16

基金项目: 海南省自然科学基金项目(20166223); 海南热带海洋学院校级青年基金项目(QYQN201428).

作者简介: 林 越(1981-), 男, 海南三亚人, 博士生, 副教授, 主要从事电力市场及智能电网研究.

通信作者: 刘廷章, 教授, 博士生导师.

“危险”的。例如,当配电网处于用电高峰时,它不偏好于把电卖给少电的微网,它偏好于为多电、少电微网提供交易平台收取服务费用。当配电网处于用电低谷时,它偏好于把电售给少电微网,而不偏好于提供平台收取服务费。总的来说,配电网既希望微电网帮助其削峰填谷,又希望具有间歇特性的微网并网时降低对它冲击的概率。本文从这个角度出发,建立了混合策略下的博弈模型,寻找其混合策略纳什均衡,同时求得配电网与微网各自混合策略组合的概率分布——交易偏好。最后分析了各参数对交易偏好的影响,并解释了其物理意义。

1 理论分析

1.1 模型假设

为了方便起见,在多微网系统中,我们把功率大于零的微网简称为多电微网,功率小于零的微网简称为少电微网。少电微网在该博弈模型中不存在电价报价主动权,故博弈方的个数只需考虑多电微网的个数及一个配电网。这里需要说明,虽然博弈方不考虑少电微网数,但是不管是多电微网还是配电网的收益均需要计算从少电微网处获得的收益。设全部多电微网的富余功率向量为 P , 维度 $1 \times N$, 第 i 个分量 P_i 表示多电微网 i 的功率富余量, P_i 可以为负值。则博弈方总数

$$N_G = N_e + 1 \quad (1)$$

式中: N_e 为系统中多电微网的个数。

目前,电力市场存在第三方服务机构并不是普遍现象,同时也为了简化模型,假设不存在第三方服务机构,直接由配电网提供微网间的服务平台。若微网间发生电量交易,则配电网按功率对两个微网双向收取服务费

$$u_{\text{dser}} = 2S_d T \sum_{k=1}^{N_e} P_{\text{MGED}jk} \quad (2)$$

式中: S_d 为配电网服务报价, T 为时间, $P_{\text{MGED}jk}$ 为多电微网 j 向少电微网 k 售电的功率。特别说明:若微网与配电网之间发生正常电量交易,配电网为受益方,所以其服务平台不能向微网收取服务费。

在同一时间段内的初始时刻,多电微网与配电网均独立售电报价,配电网为微网提供服务报价。配电网的收益等于向多电微网购电支出、向少电微网售电收入、服务收益与成本的代数和,即

$$u_d = -d_b T \sum_{j=1}^{N_e} P_{\text{edj}} + d_s T \sum_{j=1}^{N_d} P_{\text{ddk}} + u_{\text{dser}} - g_d T \sum_{i=1}^N P_i \quad (3)$$

式中: P_{edj} 为多电微网向配电网的售电功率, P_{ddk} 为少电微网向配电网的购电功率, d_b 为配电网的购电电价, d_s 为配电网的售电报价, g_d 为传统能源发电边际成本, N_e 与 N_d 分别为系统中多电微网数与少电微网数。

目前政府对于清洁能源实行补贴制度,所以微电网风、光、地热等清洁能源实际发电成本为

$$g_u = g_{\text{MG}} - g_{\text{sub}} \quad (4)$$

式中: g_{MG} 为微电网风、光、地热等清洁能源平均发电成本, g_{sub} 为政府补贴风、光、地热等清洁能源平均单价。

多电微网按照收益最大的原则,与少电微网或配电网交易,直至消除富余功率。则多电微网的收益等于向少电微网售电收入或向配电网售电所得、服务花费与成本的代数和,即

$$u_{\text{MG}} = d_b T \sum_{j=1}^{N_d} P_{\text{edj}} - u_{\text{dser}} - g_{\text{MG}} \quad (5)$$

式中: P_{edj} 为多电微网向少电微网或配电网的售电功率。

若向多电微网和配电网的购电花费相同时,为了减少间歇性发电能源对配电网冲击的概率,规定少电微网优先向多电微网购买。如多电微网交易后,若多电微网仍然存在电量富余,配电网将在合适的时间将其全部收购。

1.2 混合策略纳什均衡模型求解

混合策略是与纯策略相对应的博弈论概念.

定义 1^[12] 在一个有 n 个人参与的标准博弈 $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$ 中, 设博弈方 i 的策略空间为 $S_i = \{S_{i1}, \dots, S_{ik}\}$, 博弈方 i 以概率分布 $p_i = (p_{i1}, \dots, p_{ik})$ 随机在其 k 个可选策略中进行选择, 以这种方式得到的“策略”称为混合策略, 其中 $j = 1, \dots, k, 0 \leq p_{ij} \leq 1$, 且 $p_{i1} + \dots + p_{ik} = 1$.

如若不存在博弈方 i 以概率分布 $p_i = (p_{i1}, \dots, p_{ik})$ 随机在其 k 个可选策略中进行选择, 则把其策略称为纯策略.

混合策略表示的是博弈方对各个纯策略的偏好程度, 是对多次博弈达到均衡结局的各个纯策略选择的概率估计, 因此表现为一种主观概率的意义. 纯策略可以理解为混合策略的特例, 即在诸多策略中, 选择某一纯策略的概率为 1, 选其他纯策略的概率为 0.

定义 2 若一个混合策略 $(x, y) \in X \times Y$ 满足下列条件:

$$1) u_1(x, y) \geq u_1(s_i, y), \forall s_i \in S$$

$$2) u_2(x, y) \geq u_2(x, t_j), \forall t_j \in T$$

则称 (x, y) 是混合策略纳什均衡.

对于只有两个博弈方博弈模型而言, 该博弈存在混合策略纳什均衡应有下列式子成立

$$u_1(x, y) = u_2(x, y) \quad (6)$$

式中:

$$u_1(x, y) = \sum_{i=1}^n x_i u_1(s_i, y) \quad (7)$$

$$u_2(x, y) = \sum_{j=1}^n y_j u_2(x, y_j) \quad (8)$$

1.3 混合策略纳什均衡的存在性

为了便于证明混合策略纳什均衡的存在性, 先引入一个引理:

引理 1^[11] 只要策略空间足够大, 多微网系统电量交易一定存在纯策略纳什均衡.

显然, 根据混合策略的定义, 纯策略也是特殊的混合策略, 是当选择某一纯策略的概率为 1、选择其余纯策略的概率为 0 时的混合策略, 是混合策略的特殊情况. 反过来, 混合策略又可以看作纯策略的推广与扩展, 混合策略是由全部纯策略以凸组合方式产生的一个策略.

由以上可得

定理 1 只要策略空间足够大, 多微网系统电量交易一定存在混合策略纳什均衡.

证 由于策略空间足够大, 满足引理 1 的条件, 则多微网系统电量交易一定存在纯策略纳什均衡, 又由于纯策略纳什均衡只是混合策略纳什均衡的特殊情况, 那么该多微网系统电量交易一定会存在混合策略纳什均衡. 证毕.

若能求得所建立的混合策略纳什均衡, 则说明系统在各自的偏好下能达到稳定的状态, 在该状态下各博弈方均没有单方面偏移其策略的趋势或意愿^[13].

2 算例结果与分析

为了便于计算同时也不失一般性, 假设某区域的智能电网中有 3 个微电网与 1 个配电网, 它们彼此之间可以进行电量交易, 交易平台由配电网提供服务, 因此构成一个多微网系统. 微网功率向量可表示为 $P = [a \ b \ c]$, 其中 $a < 0, b < 0, c > 0$. 显然, 该系统中同时存在多电微网与少电微网, 因此博弈存在.

在市场经济中, 各生产企业或部门均希望获得利润最大化, 在该多微网系统中的各博弈方当然也希望如此. 多电微网根据配电网的售电报价及服务费用, 考虑自己的成本后提出自己的报价, 少电微网无报价权, 只能被动接受且无正收益. 为了简化问题, 把多人零和博弈改为两人非零和博弈^[14-15]. 在这里, 多电

微网追求利润最大化,配电网在保证其不受到冲击的前提下也力求利润最大,二者形成博弈关系。

在本博弈中,多电微网有两种选择:把电售给配电网与把电售给少电微网;配电网也有两种选择:和微网(包括多电与少电微网)发生直接电量交易、提供服务平台收取费用。

当多电微网把电售给配电网时,不管配电网是否提供服务平台,配电网的利润均为

$$a_{11}=a_{12}=c(d_b-g_u)$$

(9)

式中:已知 $d_b=0.4$ 元/(kW·h)为配电网购电单价, $g_{MG}=0.75$ 元/(kW·h)为微电网平均发电成本, $g_{sub}=0.335$ 元/(kW·h)为政府补贴发电平均单价,则代入公式(4)可得 $g_u=0.365$ /(kW·h)。

同理,不管配电网是否提供服务平台,配电网的利润均为

$$b_{11}=b_{12}=(a+b)d_s-cd_b-(a+b-c)g_d$$

(10)

式中: d_s 为配电网售电报价、 $g_d=0.375$ 元/(kW·h)为配电网平均发电成本。

当多电微网把电售给少电微网时,配电网的选择是只和微网间直接电量交易,这时多电微网的电没有服务平台暂时卖不出去,由式(4)可求得该多电微网利润为

$$a_{21}=-cg_{u_3}$$

(11)

由式(3)可求得配电网的利润为

$$b_{21}=(a+b)d_s-(a+b)g_d$$

(12)

当多电微网把电售给少电微网,而且配电网愿意提供服务平台时,由式(4)可求得该多电微网的利润为

$$a_{22}=c(i-s_d-g_{u_3})$$

(13)

同样由式(3)可求得配电网的利润为

$$b_{22}=(a+b+c)d_s-(a+b-c)g_d+2cs_d$$

(14)

由此可以得到博弈的得益矩阵如表 1 所示。

表 1 博弈得益矩阵

策 略	配电网直接和微网交易电量	配电网提供平台,收取费用
多电微网把电售给配电网	(a_{11}, b_{11})	(a_{12}, b_{12})
多电微网把电售给少电微网	(a_{21}, b_{21})	(a_{22}, b_{22})

* a_{ij} 为多电微网在策略 i 对应配电网策略 j 下的得益, b_{ij} 为配电网在策略 i 对应微电网策略 j 下的得益。

从上表可以容易得出,当 $d_b < i - s_d$ 时,多电微网的收益不可能相等,即方程(6)无解,所以该博弈不存在纯策略的纳什均衡,但根据定理 1 存在混合策纳什均衡。设多电微网把电售给配电网的偏好概率为 p_1 ,配电网提供服务平台的偏好概率为 p_2 。

在给定多电微网的偏好概率下,配电网不管选择哪种策略的收益应该是一样的,于是有

$$p_1[(a+b)d_s-cd_b-(a+b-c)g_d]+(1-p_1)[(a+b)d_s-(a+b)g_d]=$$
$$p_1[(a+b)d_s-cd_b-(a+b-c)g_d]+(1-p_1)[(a+b-c)d_s-(a+b-c)g_d+2s_d]$$

(15)

解得 p_1 为[0, 1]中的任意值,且

$$s_d=\frac{d_s-g_u}{2}=\frac{d_s-0.357}{2}$$

(16)

在给定配电网的偏好概率下,多电微网不管选择哪种策略的收益也是一样的,于是有

$$(1-p_2)c(d_b-g_{u_1})+p_2c(d_b-g_{u_1})=(1-p_2)(-cg_{u_1})+p_2c(i-s_d-g_{u_1})$$

(17)

解得

$$p_2(i-s_d)=0.4$$

(18)

将(16)式代入(18)式得

$$p_2\left(i-\frac{d_s-0.357}{2}\right)=0.4$$

(19)

博弈方配电网提供服务收益与其服务报价关系,配电网提供服务偏好与多电微网的电价报价、服务

报价关系如图 1 所示。

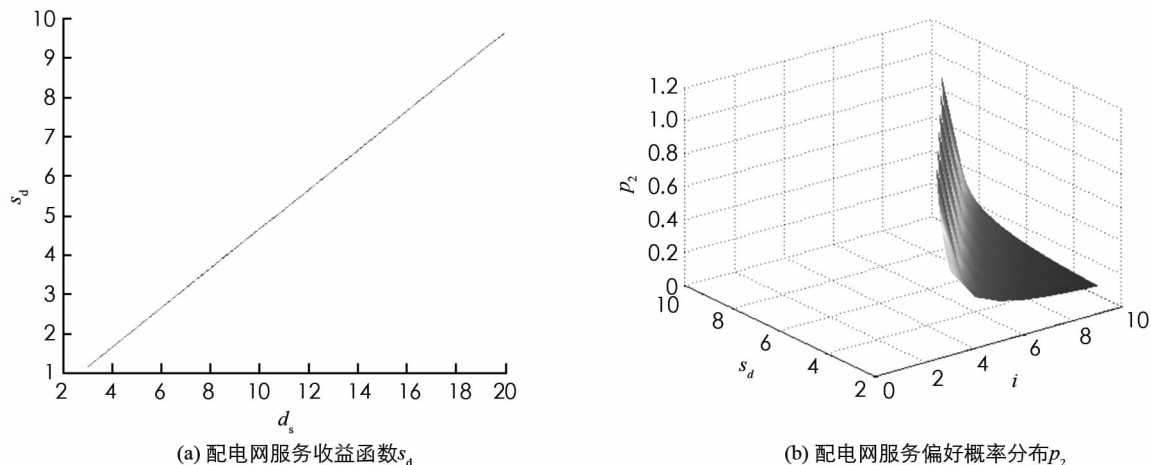


图 1 配电网服务收益与偏好博弈策略关系图

可以看出,配电网的提供服务偏好随着多电微网的电价报价增加而上升,随着其提供服务报价增加而下降。同时可以发现,改变政府补贴平均单价、微电网的平均发电成本、微电网富余、缺额功率多少均不会影响配电网的服务偏好。

以上结果表明,多电微网把电卖给少电微网还是配电网均不存在明显的偏好,即这两种偏好的程度不会对其在收益、安全、稳定性等方面造成影响。而配电网则不然,配电网处于全局考虑存在着很明显的偏好,如何选取何种偏好不仅与多电微网的电价报价、其提供服务报价有关,还与间歇性能源对其冲击的概率相关,即配电网不偏好随意与微网进行电量交易,否则容易造成对配电网的冲击,轻则影响配电网的电压稳定、谐波、电质,重则出现电网故障而造成利益损失。该结论与现实情况显然是是一致的。

3 结 论

- 1) 多电微网把电卖给配电网的偏好 p_1 为 $[0, 1]$ 中的任意值,即不存在明显偏好,把电卖给少电微网还是配电网对其均无影响。
- 2) 配电网为微网间提供平台的偏好 p_2 与多电微网的电价报价与服务价格之差成反比。
- 3) 如果多电微网的边际利润越大,配电网应减少为其提供服务平台的偏好才能总体上达到平衡。
- 4) 本方法可以推广到含有多个多电网微网系统,同样适用于多个调控因素的整体调节作用。

参考文献:

- [1] 余贻鑫,秦超. 智能电网基本理念阐释 [J]. 中国科学(信息科学), 2014, 44(6): 694—701.
- [2] 张红日. 智能电网关键技术综述 [J]. 机械工程与自动化, 2013, 4(2): 212—214.
- [3] 刘健,牛东晓,邢棉,等. 基于动态电价的新能源实时调度定价与策略研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1346—1351.
- [4] 赵珊珊,张东霞,印永华,等. 风电的电价政策及风险管理策略 [J]. 电网技术, 2011, 35(5): 142—145.
- [5] VENTOSA M, BAYLLO A, RAMOS A, et al. Electricity Market Modeling Trends [J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 897—913.
- [6] KUMAR N, DOOLLA S. Multiagent-Based Distributed Energy-Resource Management for Intelligent Microgrids [J]. IEEE Trans. On Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1678—1687.
- [7] 繆源诚,程浩忠,龚小雪,等. 含微网的配电网接线模式讨论 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 17—23.
- [8] 艾欣,许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143—149.
- [9] KASBEKAR G, SARKAR S. Pricing Games Among Interconnected Microgrids [C]//IEEE PES General Meeting.

SanDiego: IEEE/PES, 2012: 1–8.

[10] NUNNA K, DOOLLA S. Multi Agent Based Distributed Energy Resource Management for Intelligent Microgrids [J]. IEEE Trans. On Industrial Electronics, 2013, 41(1): 143–149.

[11] 赵敏, 沈沉. 基于博弈论的多微网系统交易模式研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848–867.

[12] 范如国. 博弈论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2011: 57–59.

[13] 罗云峰. 博弈论教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 28–29, 59–60.

[14] GIBBONS R. Game Theory for Applied Economist [M]. Princeton: Princeton Univ. Press, 1992: 8–9, 33.

[15] SAAD W, ZHU H, POOR H V. Coalitional Game Theory for Cooperative Micro-Grid Distribution Networks [C]// IEEE International Conference on Communications Workshops. Kyoto: IEEE, 2011: 1–5.

[16] 李清清, 周建中, 莫莉, 等. 基于通用博弈模型的电力市场均衡对比分析 [J]. 电网技术, 2010, 34(7): 14–19.

[17] 高蕾, 陈俊华, 沈长成. 基于博弈论的气候外交研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(6): 30–36.

Integration of Power Trading Preference in Nash Equilibrium Analysis of Multi-Microgrids

LIN Yue^{1,2}, MENG Xiang-wei³,
LIU Ting-zhang¹, WANG Zhe-he², HUANG Min²

1. College of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. College of Marine Communication Engineering, Hainan Tropical Ocean University, Sanya Hainan 572022, China;
3. Huizhou Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Huizhou Guangdong 516006, China

Abstract: A game model and analysis method of multi-microgrids system transaction with mixed strategy Nash Equilibrium (NE) has been proposed. Under the given model assumptions, not only considering the price quote of the multi power microgrids, the price quote of the distribution network and the influence of the service quote on the trading, but also focus on the game’s respective power trading preferences. In this paper, a three-microgrids case has been studied and simulation results been analyzed, which explains the practical significance of mixed strategy Nash Equilibrium in the system, and finally studies the influence of various parameters on the mixed strategy Nash Equilibrium point.

Key words: preference; mixed strategy; Nash Equilibrium; smart grids; power trading

责任编辑 汤振金