

分布式能源系统与电网的区域合作仿真

侯健敏^{1,2} 周德群¹ 张慧明³

摘要

电网对分布式能源系统的态度很大程度上是出于利益的考虑,如果能够实现双赢,则二者共同合作满足区域用电将是缓解能源危机和供电压力的有效途径.应用 Agent 技术,将分布式能源系统和电网看作区域内的两类 Agent,以实现各自预期利润为目标建立区域合作仿真模型,通过“调整策略—实现利润”的迭代过程获取二者双赢的边界条件及合作轨迹.最后以上海浦东国际机场能源中心热电联产系统为研究对象,验证该方法的有效性.

关键词

分布式能源; 电网; 区域合作; Agent

中图分类号 TK019; TP391

文献标志码 A

收稿日期 2010-12-27

资助项目 国家自然科学基金(70873058, 60874111); 国家自然科学基金重大项目(08&ZD046)

作者简介

侯健敏,女,博士生,研究方向为分布式能源系统和 M-Agent 建模.

houjianmin2008@163.com

0 引言

以煤为主的能源结构、电力短缺的现状以及低碳经济的需求使我国的电力发展面临严峻挑战,大机组、大电网、超高压的单一模式受到严峻考验.分布式能源系统(Distributed Energy Systems, DES)由于其能够实现能源的阶梯利用,能源综合利用率高,污染排放少,已受到各国普遍重视;并且,分布式能源作为一个相对独立的能源供应系统,可与大电网互补来保障供电安全.因此,在适宜的地方推广分布式能源是一项有利于解决能源、经济、环境矛盾,实现国家可持续发展的重要决策,因而受到很多专家学者关注.

对于分布式能源系统的研究,不少学者从系统宏观分析入手,研究分布式能源系统的规划、利用问题^[1-3]; Maribu 等^[4]通过建模预测了分布式能源在美国不同地区和各类建筑中的发展潜力.针对我国实际情况,由于分布式能源在我国还处于发展初期,技术、观念、政策等方面还有待进一步完善,理论研究和实际应用尚有很大空白,因此认清分布式能源本质,探讨发展途径是当务之急.诸多实践证明分布式能源系统的成功很大程度上依赖于电网的态度^[5],故加强对分布式能源系统和电网关系的研究具有重要的现实意义.胡庶等^[6]认为只考虑分布式能源系统的单方效益,发展阻力较大,而若优化运行、合理分配利益,则可实现分布式能源系统和电网的双方共赢.作者应用博弈论分析二者的关系,但其只着重于讨论博弈双方可能获得的最大利益,而无法体现其合作过程.本文采取自底向上的多主体建模方法,将分布式能源系统和电网作为两类 Agent(DES Agent 和 GRID Agent),以各自年利润为行为函数,研究其共同合作满足区域用电时,其利益随价格、规模等因素的变动情况,以及为了实现二者共赢的策略调整行为.该方法更加有利于认识分布式能源在整个区域能源系统中的作用,从而为推动其发展提供新的研究思路.

1 Agent 建模

1.1 主体描述

在经济领域,Agent 通常被认为是在一定环境下能独立运行、不断从环境中获取知识来提高自身能力以取得最大利益的智能主体^[7].多 Agent 技术适用于分布、开放的复杂系统和动态环境问题^[8],所以采用多 Agent 技术来仿真区域能源系统是一种可行的思路.

1 南京航空航天大学 经济与管理学院,南京,210016

2 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京,210044

3 南京信息工程大学 经济管理学院,南京,210044

为了研究分布式能源系统和电网的合作行为, 在区域能源系统中抽象出两类 Agent, 即分布式能源系统 Agent(DES Agent) 和电网 Agent(GRID Agent). 分布式能源系统 Agent 主要是针对某区域用户提供电力及将烟气经余热锅炉转换后向用户供热, 其主要行为是发电量决策. 电网 Agent 作为市场的主要参与者, 在保证自己的利益的前提下与分布式能源系统共同合作, 满足该区域用电.

1.2 主体模型

在分析分布式能源系统和电网的关系时, 经济利益是至关重要的联系纽带. 要让二者充分合作, 就要保证各自的经济利益. 围绕两类 Agent 实现预期年利润的目标, 建立各自主体模型. 本文中有如下假设:

1) 分布式能源系统的成本中未计及人力成本及审批成本等;

2) 为了保证分布式能源系统的利益并促进其发展, 假设电网的亏损部分可以由政府财政补贴来抵消;

3) 考虑到电网的垄断性质, 默认其利润与售电量呈正相关关系, 因此在讨论分布式能源系统对电网的影响时, 只计算电网的收入变化而无需计算其利润, 这样即可避免成本的计算.

1.2.1 分布式能源系统的利润

分布式能源系统的利润采用收入和成本之差来表示, 但在分布式能源系统规划之初, 可参考分布式能源系统的用户在安装分布式能源系统之前所支付的电和热的费用作为其收入(因为没有人愿意支付比过去更多的费用).

对分布式能源系统的利润计算:

$$P_{des} = E_{in} - E_{cost} \quad (1)$$

其中:

$$E_{in} = \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} P_j \cdot G_{i,j} + H \cdot M \quad (2)$$

$$E_{cost} = \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} \phi(Q_{i,j}) \cdot F + Q \cdot N \quad (3)$$

式中: P_{des} 表示分布式能源系统的年利润; E_{in} 表示分布式能源系统的产能收入, 包括所发电力和热力的收入, 其中 $\sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} P_j \cdot G_{i,j}$ 表示分布式能源系统的售电收入, $G_{i,j}$ 表示某时段的发电量, P_j 表示该时段的售电价, $H \cdot M$ 表示热能的收入, H 表示蒸汽的单价, M 是分布式能源系统中余热锅炉产生的热量; E_{cost}

表示分布式能源系统的成本, $\sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} \phi(Q_{i,j}) \cdot F$ 表示一年中分布式能源系统发电所支付的燃料费, $\phi(Q_{i,j})$ 表示装机容量为 $Q_{i,j}$ 的发电机组某日某时的发电出力, F 表示单位电量所耗燃料的费用, $Q \cdot N$ 表示装机容量为 Q 的发电机组和配套余热锅炉的年成本, N 表示单位装机容量的固定年费用(折算到等年值的初装费及每年的管理维护费用).

1.2.2 电网的收益变化

分布式能源系统对电网的收入影响, 主要是两部分: 电网的用户减少, 从而降低其收入; 另一方面, 如果减少的售电收入可以通过准入费用来补偿, 则对电网的影响将会减小. 电网的收益变化可表示为

$$\Delta R_{grid} = F_{allo} - \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} S_j \cdot G_{i,j} \quad (4)$$

式(4)中, ΔR_{grid} 代表电网的收益变化, F_{allo} 表示分布式能源系统的准入补偿费用, 这部分费用本该由分布式能源系统来承担, 但参考国外做法, 为了鼓励分布式能源系统发展, 该费用也可由政府通过财政补

贴的方式予以解决. $\sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} S_j \cdot G_{i,j}$ 表示由分布式能源系统分担了某区域的用户供电而降低的售电收入, 其中 $G_{i,j}$ 的值相当于分布式能源系统某时段的发电量, S_j 表示该时段电网的售电价.

1.3 主体的决策行为

各主体总是试图使自己的利益最大化, 但同时又存在相互的约束作用. 一方的策略改变会影响另一主体的行为, 从而引起区域市场和利益的重新分配. DES Agent 和 GRID Agent 的具体决策行为如下.

1.3.1 DES Agent 的决策行为

分布式能源系统的运营可能会出现. 亏损或盈利两种情况, 从而也就对应两种不同的调整策略.

1) 当 $P_{des} \leq 0$ 时, 执行

$$Q(t) = k_1 \cdot Q(t-1) \quad (5)$$

或

$$G_{i,j}(t) = k_2 \cdot G_{i,j}(t-1) \quad (6)$$

其中 k_1 和 k_2 是调整系数, 且 $0 \leq k_1 < 1$, $k_2 > 1$.

分布式能源系统出现亏损大多是由于初期规划时用电需求估计过高, 而实际系统没有满负荷运作所致. 这时需在原来的基础上减小装机容量(规划时) 或增加实际用电负荷(已运行系统), 即分别执行式(5) 或(6) 的调整方案.

2) 当 $P_{des} > 0$ 时, 执行

$$Q(t) = k_3 \cdot Q(t-1). \quad (7)$$

其中 k_3 是调整系数,且 $k_3 > 1$.

即当系统利润大于零时,可考虑在适当的地方再投资,扩大分布式能源系统规模,也就意味着当分布式能源系统确实能带来可观利润时,其示范作用可加快分布式能源系统发展.

1.3.2 GRID Agent 的决策行为

电网由于分布式能源系统的加入而造成其用户的减少,从而其售电收入受到影响,因此,需要采取适当措施以保证 $\Delta R_{\text{grid}} \geq 0$. 保障电网的收益有两种手段:增加分布式能源对电网的补偿或减少分布式能源覆盖地区的用电量. 即执行

$$F_{\text{allo}}(t) = k_4 \cdot F_{\text{allo}}(t-1), \quad (8)$$

或

$$G_{i,j}(t) = k_5 \cdot G_{i,j}(t-1). \quad (9)$$

其中 k_4 和 k_5 是调整系数,且 $k_4 > 1, 0 \leq k_5 < 1$.

2 区域合作仿真步骤

按照 M-Agent 仿真的方法讨论 DES Agent 和 GRID Agent 的合作过程就是不断调整策略(电量、电价)以实现双赢的动态演化行为. 系统仿真过程如下.

1) 给定初始参数,包括天然气价格、蒸汽价格、电网电价、发电机组和余热锅炉的年固定成本等.

2) 初始化变量,其值随着仿真过程不断调整. 对分布式能源系统,初始化其装机容量 Q 为一个随机值, $Q \in [10 \text{ kW}, 100 \text{ MW}]$. 对于电网的补偿费用给一随机值 F_{allo} ,且有 $F_{\text{allo}} \geq 0$.

3) 计算分布式能源系统的年利润 P_{des} 和电网的收益变化 ΔR_{grid} . 若 $P_{\text{des}} \leq 0$, 则按照式(5)或(6)执行相应调整策略;否则执行式(7)的策略;若 $\Delta R_{\text{grid}} \leq 0$, 则按照式(8)或(9)执行相应调整策略.

4) 策略调整以后重新计算各自利润和收益,重复以上过程,直到出现以下两种结果之一即停止:①同时出现 $P_{\text{des}} \geq 0$ 和 $\Delta R_{\text{grid}} \geq 0$, 即出现双赢局面,迭代过程结束,分析仿真结果的现实意义;②迭代过程超过设定次数仍不停止,即无法出现双赢局面. 这时,要考虑模型的局限性,即只考虑电量和电价因素已无法实现双赢,而应同时考虑其他因素,如天然气价格、分布式能源并网、政策干预等.

3 算例分析

3.1 系统概况

以上海浦东国际机场能源中心的热电联供系

统^[9]作一算例分析. 该中心由一台额定功率 4 000 kW 的 10.5 kV 燃气轮机发电机组和一台额定蒸发量 9.7 t/h 利用燃气轮机排出的高温烟气产生 0.9 MPa 饱和蒸汽的余热锅炉组成. 燃气轮机热电联供系统的燃料以使用天然气为主,发电机组产生电能送到机场 35 kV 航飞站通过 10.5 kV 母线与市电网向母线下用户送电,余热锅炉产生的饱和蒸汽通过能源中心、锅炉房的分汽缸向蒸汽用户输送.

3.2 合作供电

在分析该系统和电网的合作关系时,考虑到数据的完备性以及系统调整前后的可对比性,本文选取文献[9]中 2002 年上半年和下半年的系统参数进行计算. 选取初始参数分别为:天然气 1.9 元/Nm³, 柴油 2 400 元/t,蒸汽 206 元/t,自用电价 0.7 元/kWh,分布式能源发电量的峰平加权电价平均值按 0.728 4 元/kWh 计算. 表 1 为分布式能源系统在不同运行功率下的利润,以及在各不同情况下对电网的影响. 同时表 1 也给出了为了保障双方利益,各主体应满足的边界条件.

3.3 结果分析

1) 表 1 中 1—6 月平均负荷为 1 730 kW 时,系统的利润为负数;而 7—12 月,随着系统平均负荷提高到 3 091 kW,系统的利润明显增加,达到 90.34 万元. 显见在前半年,燃气轮机热电联供系统的电负荷相对不足,运行的经济性较差,而在下半年对电负荷进行调整后,使得燃机并网点上的用户负荷增加,燃机能够高负荷运转,从而确保其利润.

2) 增加并网点上的用户负荷,势必会减少电网的收益. 这一点,分布式能源系统和电网存在着利益上的竞争关系. 如果能够协调好二者的关系,达到双赢,则在该区域分布式能源系统和电网有着很好的合作空间. 表 1 中,分布式能源系统获利的临界状态下,电网收益减少 351.73 万元. 对于减少的这部分收入,可以由分布式能源系统承担作为入网补偿费用,而政府则在财政上对分布式能源系统予以补贴. 在该状态下,计算所得政府补贴分布式能源系统 0.28 元/kWh,即可以实现双赢. 此处只列出一种补偿途径,实际中可采取多种方式,比如可以采取按系统装机容量来补贴的方法,如上海按 1 000 元/kW 补贴.

3) 分布式能源系统和电网实现双赢合作的边界条件为:系统发电功率为 2 500 kW,半年发电量达 500 万 kWh 可确保分布式能源系统不亏损;而政府

表 1 分布式能源系统与电网的合作供电仿真结果

Table 1 The simulation results of cooperation between DES and grid for power supply

	平均负荷/ kW	DES 成本/万元		DES 产出/万元		DES 利润/ 万元	无补贴时电网 收益变化/ 万元	电网不亏损时 需财政补贴/ (元/kWh)
		原料支出	设备投入	发电量	蒸汽量			
2002 年 1—6 月	1730	53.96	257.55	49.02	32.10	-230.39	-36.58	0.22
2002 年 7—12 月	3091	453.76	257.55	506.05	295.60	90.34	-493.60	0.29
边界值	2500	341.49	257.55	364.20	234.84	0	-351.73	0.28

注: 边界值是为了保障双方利益, 各主体应满足的边界条件。

对分布式能源系统补贴 0.28 元/kWh, 可补偿由于分布式能源系统的加入而对电网造成的损失。该方法和结果可在分布式能源系统和电网的合作初期, 作为二者设计实现以及谈判的参考依据。

4 结论

本文借助 Agent 技术, 将分布式能源系统和电网分别看作区域内的两类 Agent, 以年利润作为影响其决策的指导因素, 建立其区域合作仿真模型, 通过分析可以得出以下结论:

1) 分布式能源系统只有满负荷运转时, 利润才可得, 以全面体现。若初期规划规模太大, 而实际运力不足, 则会由于分摊成本太多而致亏损。

2) 分布式能源系统使电网用户减少, 电网售电量的减少会使其利润减少, 这也是来自电网阻力的主要原因。这部分损失如果能够得以补偿, 则可实现双赢。发展初期可以通过政府财政补贴的形式加以鼓励。

3) 该方法通过分析 DES Agent 和 GRID Agent 的微观行为, 可以获得二者合作的边界条件和演变轨迹, 从而为建立双方的有效合作机制以及制定相关政策提供理论参考, 但鉴于数据获取的难度, 本文只针对已经正常运行的上海浦东机场能源中心进行了验证性分析。该方法还可用于投资前的可行性分析。

参考文献

References

- [1] 余晓明, 曾君, 郭红霞, 等. 基于 multi-Agent 和 Petri 网的分布式风光互补系统 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 353-356
YU Xiaoming, ZENG Jun, GUO Hongxia, et al. Distribu-
- ted wind-PV system based on multi-Agent and Petri nets [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(2): 353-356
- [2] Celli G, Ghiani E, Mocci S, et al. A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 750-757
- [3] Van Dam K H, Houwing M, Lukszo Z, et al. Agent-based control of distributed electricity generation with micro combined heat and power: Cross-sectoral learning for process and infrastructure engineers [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(1/2): 205-217
- [4] Maribua K M, Firestone R M, Marnay C, et al. Distributed energy resources market diffusion model [J]. Energy Policy, 2007, 35(9): 4471-4484
- [5] 华贲. 广州大学城分布式冷热电联供项目的启示 [J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2009, 5(2): 97-102
HUA Ben. An inspiration to Guangzhou university town's DES/CCHP project [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science, 2009, 5(2): 97-102
- [6] 胡庶, 吴耀武, 姜素华, 等. 用户自备分布式发电与供电商的博弈 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 21-25
HU Shu, WU Yaowu, LOU Suhua, et al. Gaming between customer invested DG and DISCO in pool-based electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 21-25
- [7] 邓宏钟, 谭跃进, 迟妍. 一种复杂系统研究方法: 基于多智能体的整体建模仿真方法 [J]. 系统工程, 2000, 18(4): 73-78
DENG Hongzhong, TAN Yuejin, CHI Yan. A complex system research method-multiagent-based ensemble modelling and simulation method [J]. Systems Engineering, 2000, 18(4): 73-78
- [8] Wooldridge M. An introduction to multiagent systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002
- [9] 忻奇峰. 燃气轮机热电厂的应用和发展 [J]. 上海节能, 2005(6): 142-157
XIN Qifeng. Application and development of heat-electricity cogeneration system for gas turbine [J]. Shanghai Energy Conservation, 2005(6): 142-157

Modeling of regional cooperation between distributed energy systems and power grid

HOU Jianmin^{1,2} ZHOU Dequn¹ ZHANG Huiming³

1 College of Economics and Management ,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,Nanjing 210016

2 School of Information and Cybernetics ,Nanjing University of Information Science and Technology ,Nanjing 210044

3 School of Economics and Management ,Nanjing University of Information Science and Technology ,Nanjing 210044

Abstract Power grid is an important factor in the development of distributed energy ,so the research on the relationship between them is very necessary. If Win-Win cooperation for power supply in the region can be achieved ,it will provide an effective way to relieve the energy crisis and the pressure of power supply. In this paper ,distributed energy systems and power grid in a certain region are abstracted as two types of Agent by using the approach of Agent modeling. The model of regional cooperation is established to simulate the decision-making behavior with the guidance of expected annual profit. By the iterative process of “adjusting the strategy and calculating the profit ” , the simulation illustrates the boundary conditions and the adjustment track of win-win cooperation. Finally an example of the Energy Center of Shanghai Pudong International Airport is put forward to prove the effectiveness of the method.

Key words distributed energy systems; power grid; regional cooperation; Agent