

DOI: 10.7667/PSPC152045

一种电力市场环境下的电源规划多智能体模型

黄仙, 郭睿

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 电源规划一直是电力系统中重要问题之一。在电力市场环境下, 这一问题更加复杂、迫切。针对这一问题, 基于多智能体技术, 提出了电力市场环境下发电集团电源投资规划模型。首先, 构建了一个电力市场发电侧的双层优化架构, 以实现市场竞价问题与电源规划问题相结合。其次, 设计了发电集团、发电市场以及发电厂等智能体, 并引入遗传算法、Q-learning 算法完善各智能体寻优能力。通过算例验证了所建立的模型是可行的、有效的, 可为电站建设决策部门提供有价值的参考。

关键词: 可再生能源; 电源规划; 电力市场; 多智能体; 遗传算法

A multi-agent model of generation expansion planning in electricity market

HUANG Xian, GUO Rui

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The generation expansion planning is an important problem in electric system, especially complex and urgent in the background of electric market. To this issue, this paper proposes a generation investment planning model for power companies, which is based on multi-agent technology. Firstly, a double-layer optimization construction for the generation-side in electric market is developed in order to combine the price competition with generation expansion planning. Secondly, multiple agents such as generation groups, generation market and generation plants are designed with genetic algorithm and Q-learning algorithm applied to improve their optimization ability. The result presents that the model is feasible and effective and could provide support for decision making to plant expansion planning.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61273144 and No. 61533013).

Key words: renewable energy; generation expansion planning; electricity market; multi-agent technology; genetic algorithm

0 引言

在传统电力工业中, 电源规划的主要目的是根据某一时期的负荷需求预测, 在满足一定的可靠性水平条件下, 寻求一个最经济适用的电源开发方案^[1]。它主要确定何时何地建何种类型多大容量发电厂或发电机组。随着电力市场机制改革的深入, 电力市场逐步放开, 电力系统电源规划显得更加重要。电力市场机制的改革改变了原有以总成本最小为目标的集中电源规划的范例^[2]。电源规划不再是政府部门的单一问题, 也是电力公司需要研究的问题。

国内外学者对电源规划进行多方面的研究。传统的电源规划主要是将整个电力系统或发电侧系统看作一个整体, 以整个系统的成本最小化或者收

最大化作为优化目标^[3-8], 综合考虑其他因素, 如供电可靠性, 环境成本等。与传统体制电源规划相比, 电力市场环境下的发电投资决策目标由原来的考虑整个系统成本最小变为投资者自身投资收益最大化^[9-10]。国内外研究者将博弈论^[11-12], 多智能体技术^[13-16]应用于电力市场环境下的发电投资规划问题, 形成了一些新的电源规划模型。文献[11]以非合作博弈论和实物期权理论为基础, 构造了发电投资规划的延迟期权博弈模型。文献[13]利用多智能体技术提出一个分散的电力公司投资规划模型, 利用概率统计和方案树分析了竞争对手的不确定性。文献[14-15]将多智能体技术应用于经济-电力动态模拟系统的构建中, 通过智能体之间的协作、交互模拟经济个体行为, 研究政策对经济和电力需求的影响。文献[16]考虑供需双方的动态交互影响, 提出一个双边多智能体模型, 运用博弈论、粒子群混合算法进行求解, 并与传统单一博弈论方法进行比较。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61273144, 61533013)

以上文献对电源规划问题进行了较多方面的研究,但大多数对于电价的确定较为简单,缺乏自由市场竞争和市场机制的体现,且对可再生能源这种较新能源技术的未来成本变化因素考虑的不够全面。

基于以上分析,本文将利用多智能体技术建立发电集团、发电厂和发电市场智能体(Agent),将可再生能源发电技术引入备选电源技术中,考虑电力市场中市场竞争机制和成本变化等因素,建立以发电集团规划期内投资收益最大为目标的电源规划模型。最后,通过算例分析,验证所提出的模型和方法的可行性和有效性。

1 电源投资规划的多智能体模型

1.1 总体模型框架

解决电源投资规划问题,本文考虑双层框架结构,如图1所示。一层是发电集团 Agent 电源规划;另一层是发电市场 Agent 仿真电力市场及调控。其中,发电集团 Agent 有各自下属的发电厂 Agent。各类别 Agent 有其各自规则库和知识库,其职能也各不相同。发电集团 Agent 负责根据自身条件和外部环境因素制定利益最大化的电源投资规划,控制下属发电厂 Agent 建立的时间,类别和数量。发电厂 Agent 依据竞价策略参与电力市场竞争,获得收益并将返还给发电集团。发电市场 Agent 有三个作用:(1)对发电集团 Agent 的电源规划进行调控;(2)对各类型投资成本做出相应调整;(3)对电力市场进行仿真,利用市场机制协调发电厂 Agent 的竞价上网行为。这个双层三类 Agent 的模型,充分体现了市场竞争以及各 Agent 之间的相互影响。

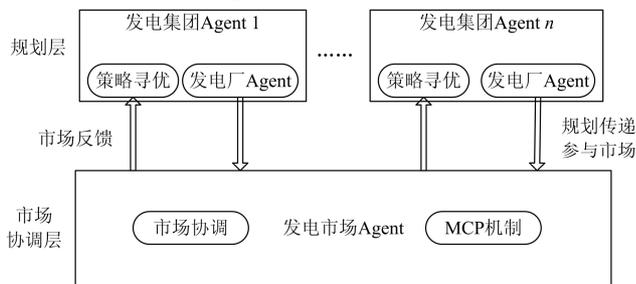


图1 模型架构

Fig. 1 Model framework

1.2 发电集团 Agent

发电集团 Agent 的功能是根据自身条件和外部环境因素来制定自身利益最大化的电源投资规划。

在市场环境中,每个发电集团 Agent 都以整个规划周期内期望收益最大化为目标,同时各发电集团 Agent 要共同保证整个电力系统的安全运行。发电集团 Agent 的目标函数为

$$\max B = C_{\text{sel}} - C_{\text{gen}} - C_{\text{inv}} \quad (1)$$

$$C_{\text{sel}} = \sum_{i=1}^{N_y} \sum_{j=1}^{N_i} \pi_{ij} E_{ij} \quad (2)$$

$$C_{\text{gen}} = \sum_{i=1}^{N_y} \sum_{j=1}^{N_i} ((F_{ij} - D_{ij}) E_{ij} + A_{ij} + M_{ij}) \quad (3)$$

$$C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^{N_y} \sum_{m=1}^M I_{im} X_{im} \alpha \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad X_{im} \leq n_{im}^{\max} \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M I_{im} X_{im} \alpha \leq L_i^{\max} \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, N_y; m = 1, \dots, M \quad (7)$$

式中: B 为发电集团规划期内系统净收益; C_{sel} 为发电集团下属发电厂的售电收益; C_{gen} 为规划期内的运行成本; C_{inv} 为规划期内电源的投资成本; N_y 为规划年限; i 为规划年份(年); N_i 为第 i 年发电集团下属在运行发电厂数量; π_{ij} 为第 i 年 j 发电厂的上网电价(元/MWh); E_{ij} 为第 i 年 j 发电厂的发电量(MWh); F_{ij} 为发电厂 j 在第 i 年的燃料费用(元/MWh); A_{ij} 为发电厂 j 在第 i 年的财务费用(元); D_{ij} 为发电厂 j 在第 i 年的政府补贴(元/MWh); M_{ij} 为发电厂 j 在第 i 年的固定维护运行费用(元); I_{im} 为 m 类型发电厂 i 年的投资费用(元); X_{im} 为 m 类型发电厂 i 年的投建数量; α 为投资的自有资金系数; n_{im}^{\max} 为第 i 年 m 类型的发电厂最大投建数; L_i^{\max} 为发电集团第 i 年的投资额度上限。

目标函数式(1)是关于发电集团 Agent 的整个规划周期内期望收益最大的函数,它主要包含三个部分:售电收益函数式(2),即发电厂的上网电价和上网电量均是参与市场竞争后由市场给出的;运行成本函数式(3),包含了发电集团下属各发电厂在整个规划期内的维护费用,燃料费用,财务费用以及政府补贴;投资成本函数式(4),即发电集团在规划期内投资到各类型发电厂的自有资金费用。

装机数目约束函数式(5)主要表示每个规划年各发电技术的装机容量的限制。

投资约束函数式(6)主要表示发电集团规划期内新增发电厂的自有投资金额不应多于其相应规划年限内的自有资金。

发电集团 Agent 的寻优算法为遗传算法。

1.3 发电市场 Agent

发电市场 Agent 为发电厂 Agent 提供了一个与电力市场相仿的交互环境。它统计电能的供需情

况, 计算电价, 并将电价反馈给发电厂 Agent, 电价的形成机制采用 MCP(市场清除价)机制: 发电市场 Agent 在接收到各发电厂 Agent 的竞价标书后, 以购电费用最小为目标, 依据发电厂 Agent 报价从低到高依次分配电量, 最后一个满足市场需求的发电厂 Agent 的电价即为市场电价, 流程如图 2 所示。整个竞价过程规划在年初进行, 通过多轮竞价得出全年的市场电价以及各个发电厂的上网电量。

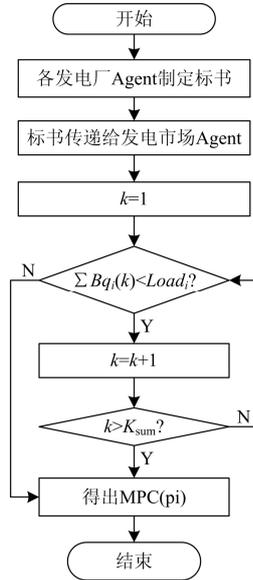


图 2 电力市场运行流程图

Fig. 2 Flowchart of electricity market operation

图 2 中: $Bq_i(k)$ 为发电厂 k 的 i 年的投标发电量; $Load_i$ 为 i 年的负荷电量需求; K_{sum} 为整个系统中运行发电厂数目的总和。

为保证电力系统供电可靠性, 发电市场 Agent 有权对发电集团 Agent 的电源投资规划进行调控。本文采用备用容量作为发电市场 Agent 调控的指标^[17], 公式为

$$RM_t = \left(\frac{\sum_{a=1}^{N_A} \sum_{i=1}^t \sum_{m=1}^M (X_{im} P^m \cdot \beta^m) - R_t}{P_{addt}} - 1 \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中: RM_t 为备用容量系数; P^m 为各发电技术的装机容量(MW); β^m 为 m 类型发电厂的稳定提供电量系数; R_t 为 t 年内累计退休发电厂的容量(MW); P_{addt} 为 t 年最大负荷相对初始年增加量(MW)。

发电技术中, 火电、水电、核电的电力供应较为稳定, 且电能质量较高, 而风电和光伏发电的电力供应波动较大, 电能质量较差。为了保证系统处于最大负荷阶段时, 电力供应的可靠性, 因此在计算累计装机容量时, 火电和核电的 β 为 1, 水电的 β 为 0.3, 风电和光伏发电的 β 为 0。当系统中的备

用容量系数低于一定值时, 发电市场 Agent 进行调控, 随机选择一个发电集团, 减少其在可再生能源的投资建设, 增加其在火电方面的投资建设。本文规定备用容量系数不得低于 10%。

发电市场 Agent 还有一个功能是根据市场环境调整发电技术的投资成本, 收集市场的成本变化情况, 为发电集团决策提供支持。发电市场 Agent 由内生技术学习曲线模型得出各发电技术的投资成本。知识和技术应用会随着时间的推移慢慢地累计致使投资成本的减少, 这就是技术学习^[18]。这一技术扩散的进程称为边做边学 (Learning-By-Doing, LBD)^[19], 其策略为

$$I_i^m = I_f^m (1 + r^m)^i \cdot 1 / \left(\frac{P_{ci}^m}{P_f^m} \right)^{LBD^m} \quad (9)$$

式中: I_f^m 为 m 类型发电厂的初始投资成本(元/MW); P_{ci}^m 为 m 类型发电厂 i 年的累计装机容量(MW); P_f^m 为 m 类型发电厂的初始装机容量(MW); LBD^m 为 m 类型发电厂的学习系数, r^m 为 m 类型发电厂的投资成本随时间变动系数。

不同的发电技术的学习系数不相同, 其中火力发电, 水力发电, 核能发电技术由于其发展较早且技术较为成熟, 故学习系数 LBD 为 0.04; 风力发电, 光伏发电技术由于其为新兴发电技术, 故学习系数 LBD 为 0.21。

1.4 发电厂 Agent

发电厂 Agent 的功能是参与电力市场竞争, 在电力市场中获取自身最大收益。

在整个电力市场中, 全部类型的发电厂, 只要处于运行阶段, 都可以竞价上网。各发电厂 Agent 可以依据自身发电成本通过学习算法自主地调整每个周期内的竞价策略以获取最大收益。结合电力市场信息不完全、不确定的特性, 各发电厂 Agent 用 Q-learning 算法来优化竞价策略。

Q-learning 算法思想是不去顾及环境模型, 直接优化可迭代计算的 Q 函数, 通过评价“状态-行为”对 $Q(s, a)$ 进行优化^[20], 其学习步骤如下:

- 1) 观察当前的状态 s_{qt} ;
- 2) 选择并且执行一个动作 a_{qt} ;
- 3) 观察下一个状态 s_{qt+1} ;
- 4) 收到一个立即收益 r_{qt} ;
- 5) 更新 Q 值。

$$Q(s, a) = (1 - \alpha)Q_{qt} + \alpha(r_{qt} + \gamma \max_{a'}(Q_{qt}(s_{qt+1}, a')))) \quad (10)$$

$$Q = C_{sel} - C_{gen} \quad (11)$$

式中: α 为学习率($0 < \alpha < 1$); γ 为未来收益的折扣系

数($0 < \gamma < 1$); r 为立即收益, Q 为发电厂的售电收益减去发电的运行成本。

发电厂 Agent 仅仅依据 Q 值大小选取策略, 很容易陷入局部最优, 一般采用 ϵ -greedy 策略进行优化, 即发电厂 Agent 以较大概率选择 Q 值最大的策略作为自己的最优策略, 同时以一个较小概率 ϵ , 随机选择除 Q 值最大的策略以外的策略。

发电厂 Agent 知识库中共有以下 6 种策略。

策略 1: $Bp_i(k) = (1 + 0.05)Bp_i(k)$

策略 2: $Bp_i(k) = (1 - 0.05)Bp_i(k)$

策略 3: $Bp_i(k) = Bp_i(k)$

策略 4: $Bq_i(k) = (1 + 0.05)Bq_i(k)$

策略 5: $Bq_i(k) = (1 - 0.05)Bq_i(k)$

策略 6: $Bq_i(k) = Bq_i(k)$

结合发电市场 Agent 采用的 MCP 竞价机制的特性, 对发电厂 Agent 的竞价策略做适当简化处理。处于电价边缘或没有发电上网的发电厂 Agent 只对电价做出改变, 即仅采用策略 1-3, 且竞价最低只能为成本价格; 已经发电上网的发电厂 Agent 只对发电量做出改变, 即仅采用策略 4-6, 且发电量最多只能为整个发电厂的发电量。

2 模型算法

2.1 总体算法

本文所采用的双层框架体系如图 1 所示, 求解算法的流程如图 3 所示, 具体步骤如下所述。

(1) 定义问题相关的数据和参数。主要是指备选电源技术的类别、单位投资成本、运行及维护成本、政府补贴、装机容量以及现有发电技术的固定成本、运行成本。同时还需明确社会需求电量和峰值负荷。

(2) 初始化 Agent 计数器 $Account=0$, 同时初始化各项参数。所有的发电集团 Agent 依次进行电源规划寻优, 利用当前环境中的信息, 即其他发电集团 Agent 的电源规划情况, 解决各自的目标函数问题。

(3) 各发电集团 Agent 制定好各自的电源投资规划, 将其传递给发电市场 Agent, 更新原有规划方案。发电市场 Agent 接受全部的电源规划方案后, 进行调控及市场环境仿真, 具体发电市场 Agent 及发电厂 Agent 的行为已在第 1 节中进行详细介绍。发电市场 Agent 将调控后的电源规划返回给发电集团 Agent 并储存。发电集团 Agent 得到规划期内下属发电厂的收益, 从而计算出自身投资收益。

(4) 判断是否到满足终止条件, 这里采用满足迭代次数终止法。若满足, 输出各发电集团 Agent 的电源投资规划。若不满足, 发电市场 Agent 更新当前电源规划信息至自身的知识库中, 同时返回第(2)步。

2.2 发电集团 Agent 遗传算法寻优

上述的总体算法中, 每次迭代所有发电集团 Agent 都要进行电源规划寻优, 而这个优化问题有两个重要的特征决定了其适用的解决算法。一方面, 发电集团 Agent 的备选电源有数量限制, 同时每个发电技术都提供典型的标准化参数, 故发电集团 Agent 的优化结果是一些离散的组合整数。另一方面, 在问题解决过程中, 某些参数值是不确定的, 如市场电价, 投资成本。因此, 本文采用遗传算法来解决发电集团 Agent 电源方案寻优问题, 同时发电集团 Agent 在寻优过程中会和发电市场 Agent 以及发电厂 Agent 进行交互, 以完成去寻优过程。

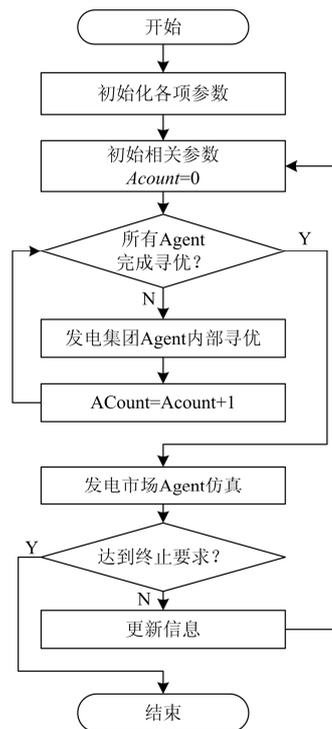


图 3 总体算法流程图

Fig. 3 Flowchart of general algorithm

遗传算法优化流程如图 4 所示。

(1) 遗传算法种群初始化。随机生成电源投资规划方案, 即不同类型的发电厂每年的投建数目。同时对生成的电源投资规划方案进行约束式(5)(6)判断, 若判断未通过, 则对方案进行校正, 确保每个算子都是可行解。

(2) 发电集团 Agent 依据算子方案依次与发电市场 Agent 进行交互, 发电市场 Agent 依据新得到的该发电集团 Agent 的规划方案和知识库中的其他发电集团 Agent 的规划方案, 进行调控和市场仿真。发电集团 Agent 得到发电厂 Agent 的返回值, 从而计算该算子规划期内的投资收益。由各算子规划期内的投资收益得到遗传算法适应度, 公式为

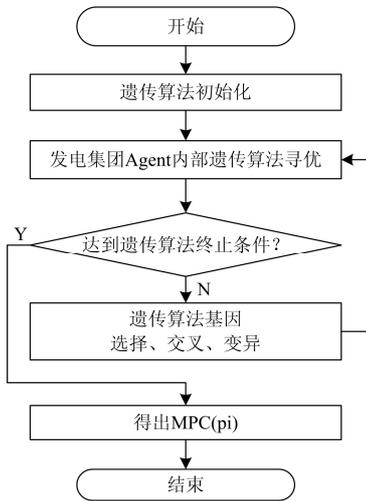


图 4 发电集团 Agent 内部寻优流程图

Fig. 4 Flowchart of optimizing process in generation group Agent

$$Gfitness(n) = B(n) - \min(B(n)) \quad (12)$$

式中: $Gfitness(n)$ 为 n 号算子的适应度; $B(n)$ 为 n 号算子得到的总收益; $\min(B(n))$ 为当前遗传代数内所有遗传算子得到的总收益最小值。

通过式(12)得到的适应度, 避免了适应度为负的情况, 也直接剔除了每代中总收益最小的算子。

(3) 判断是否达到终止条件。判断依据为遗传代数, 若满足终止条件, 则输出最优电源投资规划方案即为发电集团 Agent 最优方案, 并将该发电集团 Agent 最优电源规划方案传递给发电市场 Agent。若不满足终止条件, 则继续执行下一步。

(4) 遗传算法执行选择、交叉、变异。采用轮盘赌方法选择算子, 并执行精英保留原则。对交叉算子做出一定改进, 采用线性交叉法代替简单交叉法。

然后在执行变异运算, 得到一组新的算子, 返回第(2)步再次进行运算。

3 算例分析

3.1 基础数据

基于本文提出的电源规划多智能体模型, 对某地区的两个发电集团的电源规划进行寻优, 其中电源规划期为 15 年。发电厂参数如表 1 所示。两个发电集团 Agent 的现有发电厂状况如表 2 所示, 其中该地区当前无核电站。在规划期内, 发电集团 A 具有火电、水电、核电和光伏发电的投建权限, 而发电集团 B 具有火电、水电、核电和风电的投建权限。本文假设在未来的一段时间政府支持可再生能源的建设, 故对可再生能源实行一定补贴。规划期内的初始年年用电量为 135 亿 kW·h, 最大区域尖峰负荷为 3 000 MW, 且都从第一年开始每年以 5% 的增长率增长。本文以 5 年为一个投资周期划分发电集团投资额, 发电集团 A 1~5 年的投资额为 41.2 亿, 6~10 年的投资额为 108 亿, 11~15 年的投资额为 180 亿; 发电集团 B 1~5 年的投资额为 27.7 亿, 6~10 年的投资额为 72 亿, 11~15 年的投资额为 120 亿。假设发电集团不考虑可建发电厂的总上限, 只考虑每年建设上限, 则发电集团的各种发电技术的每年建厂上限为火电厂 1~5 年 2 座/年, 6~10 年 5 座/年, 11~15 年 10 座/年; 水电站 1~5 年 2 座/年, 6~10 年 5 座/年, 11~15 年 8 座/年; 核电站 1~5 年 1 座/年, 6~10 年 1 座/年, 11~15 年 2 座/年; 风电场 1~5 年 3 座/年, 6~10 年 6 座/年, 11~15 年 12 座/年; 光伏发电站 1~5 年 3 座/年, 6~10 年 6 座/年, 11~15 年 12 座/年。

表 1 现存电厂及候选电厂初始参数

Table 1 Parameters of existing plants and candidate plants

电厂类型	装机容量/ MW	投资成本/ (元/MW)	运行及维护费用/ (元/年)	燃料费用/ (元/MW·h)	政府补贴/ (元/MW·h)	年利用小时数/h	电厂寿命/年
火电厂	400	3 824 000	56 108 000	223.94	0	6 000	25
水电站	200	6 637 000	2 490 400	0.998	0	4 500	30
核电厂	1 000	14 788 000	428 212 000	29.89	0	7 800	60
风电厂	200	8 103 000	82 060 000	0	150	2 500	20
光伏电站	100	11 200 000	22 400 000	0	550	1 500	25

表 2 发电集团 A、B 原现存电厂参数

Table 2 Parameters of existing plants of generation group A and B

	火电厂 数量	运行年限/年	水电站 数量	运行年限/年	风电厂 数量	运行年限/年	光伏发电站 数量	运行年限/年
发电集团 A	4	17/17/20/22	3	10/25/27	0	0	1	2
发电集团 B	3	10/16/20	2	13/25	2	3	0	0

3.2 结果分析

基于上述数据，本文运行电源规划模型进行寻优，得到发电集团 A、B 的电源规划情况。两个发电集团的电源投资规划交互过程如图 5 所示。发电集团 A、B 在此模型中可以很快地达到一个相对平衡点。发电集团 A、B 的电源规划分别如图 6、图 7 所示。

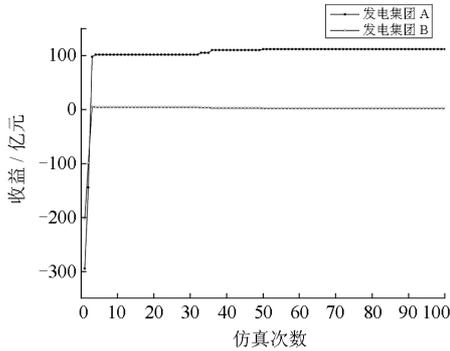


图 5 电源规划市场仿真结果
Fig. 5 Result of GEP simulation

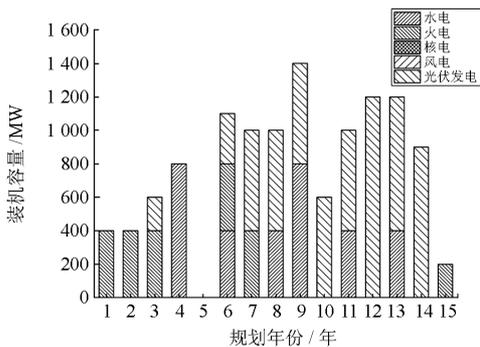


图 6 发电集团 A 的电源规划方案
Fig. 6 Generation planning of generation group A

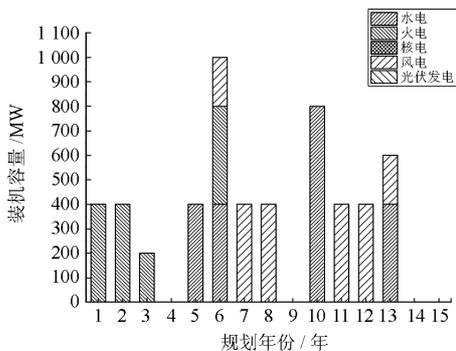


图 7 发电集团 B 的电源规划方案
Fig. 7 Generation planning of generation group B

上述结果的产生原因：(1) 由于发电市场 Agent 对发电集团的规划有一定干预，整个市场时刻处于一种供大于需的激烈竞争状态。在竞价过程中，各

电厂为获得最大收益压低自身的报价，如图 8 所示。最终，整个市场的前期市场电价为火电的成本价，后期市场电价由于风电和光伏电站的大量投建，获得较大的市场份额而被拉低，如图 9 所示。(2) 在此模型中各发电集团具有预见性，其可以预见到各类发电技术成本随时间和装机容量的变化而变化情况，如图 10 所示。考虑到风电和光伏发电在规划期内的政府补贴，其成本的变化情况，如图 11 所示。从图 11 中可以看出，光伏发电技术在政府补贴的情况下，其发电成本远低于其他发电技术的发电成本，甚至出现了负数，即政府补贴的额度大于自身的发电成本，此时光伏发电技术相较其他发电技术在竞价上网方面有很大的竞争力。因此，发电集团 A 在投资额度和装机容量允许的情况下，对光伏电站进行了大规模投建。发电集团 B 拥有风电的投建权限，在保证电力系统安全稳定运行的基础电厂投建后，选择了竞争力较大的风电进行投建，风电的补贴力度比光伏小，且未来的成本下降速度比光伏发电要慢，故发电集团 B 对于风电场的投建有一定控制，并非全额投建。

发电集团 A、B 在满足供电可靠性要求后，都选择了可再生能源发电技术作为自己投建的第一选择，表明了政府补贴的情况下，可再生能源发电技术在未来电源规划中具有一定竞争力。

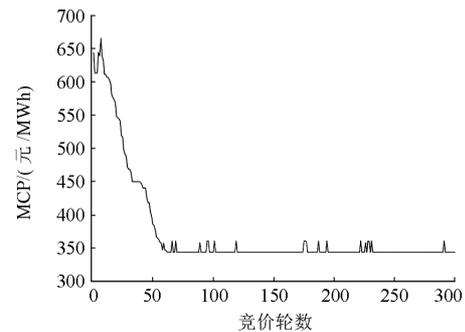


图 8 MCP 的演化
Fig. 8 Evolution of MCP

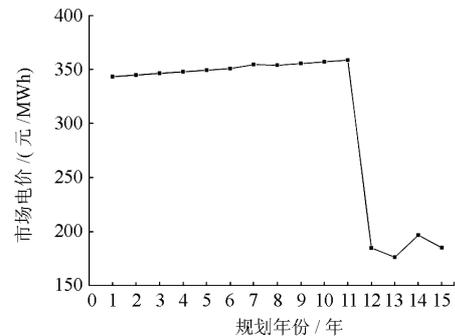


图 9 市场电价的变化情况
Fig. 9 Evolution of electric price in market

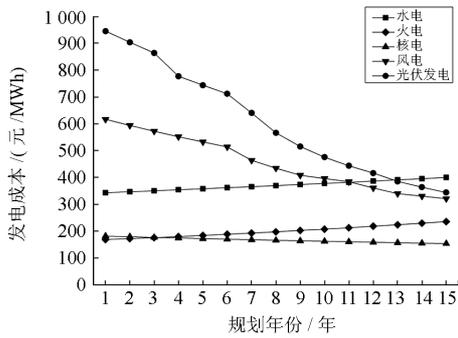


图 10 发电成本变化情况

Fig. 10 Evolution of generation cost

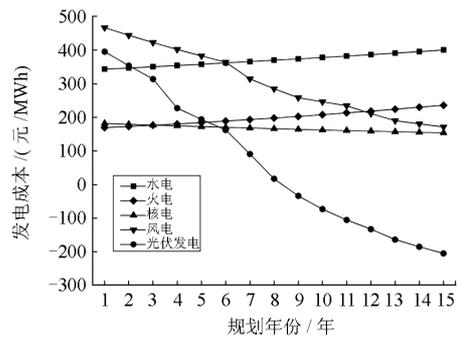


图 11 考虑政府补贴发电成本变化情况

Fig. 11 Evolution of generation cost considering subsidy

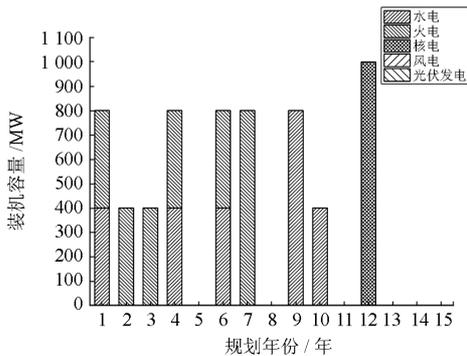


图 12 发电集团 A 的电源规划方案

Fig. 12 Generation planning of generation group A

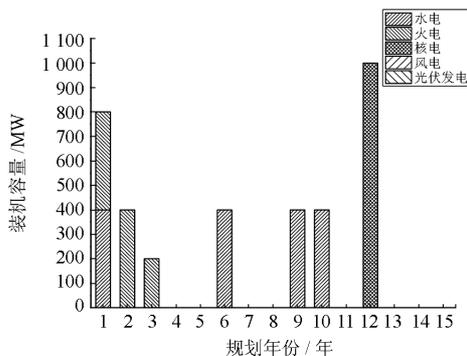


图 13 发电集团 B 的电源规划方案

Fig. 13 Generation planning of generation group B

3.3 情景对比

假设整个电源规划年限内, 可再生能源不再享受政府补贴, 两集团规划结果如图 12、图 13 所示。

由图 12、图 13 可以看出, 在没有政府补贴的情况下, 可再生能源发电技术的竞争力较差, 发电集团对其投建不积极, 从而使得可再生能源发电技术的成本下降缓慢, 陷入恶性循环。规划年份后期, 投资额度加大, 核电的成本较低, 且其供电稳定, 故两个公司同时投建了核电站。

4 结论

本文提出了一种新的电力市场环境下电源规划的多智能体模型。该模型中包含市场智能体、发电集团智能体、电厂智能体 3 类智能体。该模型的建立考虑了电力市场中电价的变动和发电技术的成本变化, 支持发电集团在制定自身的电源规划时充分考虑了其他发电集团的电源规划, 并具有一定的远见性。通过地区数据模拟, 发电集团智能体寻找到系统的平衡点。含有两个公司的算例的结果分析验证本文所提模型及方法的有效性和可行性, 并通过情景对比分析, 表明了政府补贴在电力市场竞争中对于可再生能源发电技术的作用。本文所提模型对负荷做了简化处理, 未能充分体现负荷在日常生活中的波动性, 还有待于将其与可再生能源发电的不稳定性结合起来进行进一步研究。

参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] KAGIANNAS A G. Power generation planning: a survey from monopoly to competition[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2004, 26(6): 413-421.
- [3] 丁明, 石雪梅. 基于遗传算法的电力市场环境下电源规划的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 43-49.
DING Ming, SHI Xuemei. Study of generation expansion planning based on genetic algorithms in the environment of electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 43-49.
- [4] 季震, 陈启鑫, 张宁, 等. 含碳捕集电厂的低碳电源规划模型[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2689-2696.
JI Zhen, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Low-carbon generation expansion planning model incorporating carbon capture power plant[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2689-2696.
- [5] 郭贤, 郭贺, 程浩忠, 等. 考虑用户停电损失的微网网架规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 301-308.
GUO Xian, GUO He, CHENG Haozhong, et al. Optimal

- architecture planning of microgrid considering user outage costs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 301-308.
- [6] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 等. 可再生能源激励制度下的低碳经济电源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 655-662.
ZHANG Xiaohui, YAN Pengda, ZHONG Jiaqing, et al. Research on generation expansion planning in low-carbon economy environment under incentive mechanism of renewable energy sources[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 655-662.
- [7] 陈海东. 基于细菌菌落优化算法分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 106-111.
CHEN Haidong. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on bacterial colony optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 106-111.
- [8] 段建民, 王志新, 王承民, 等. 考虑碳减排效益的可再生能源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 11-15.
DUAN Jianmin, WANG Zhixin, WANG Chengmin, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 11-15.
- [9] 贾德香, 程浩忠. 电力市场下的电源规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(5): 58-65.
JIA Dexiang, CHENG Haozhong. Review of generation expansion planning in market environment[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2007, 19(5): 58-65.
- [10] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [11] 贾德香, 程浩忠, 韩净. 发电投资的期权博弈决策方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 17-21.
JIA Dexiang, CHENG Haozhong, HAN Jing. An approach to generation investment decision-making based on real option game in power market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 17-21.
- [12] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [13] BOTTERUD A, MAHALIK M R, VESELKA T D, et al. Multi-agent simulation of generation expansion in electricity markets[C] // Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007: 1-8.
- [14] 田建伟, 胡兆光, 吴俊勇, 等. 基于多智能体建模的经济-电力动态模拟系统[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 85-91.
TIAN Jianwei, HU Zhaoguang, WU Junyong, et al. Dynamic economy and power simulation system based on multi-agent modelling[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 85-91.
- [15] 段炜, 胡兆光, 吴思竹, 等. 基于智能体响应均衡模型的经济政策-电力需求动态模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1206-1212.
DUAN Wei, HU Zhaoguang, WU Sizhu, et al. Dynamic simulation of economic policy and electricity demand by agents response equilibrium model[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1206-1212.
- [16] NESHAT N, AMIN-NASERI M R. Cleaner power generation through market-driven generation expansion planning: an agent-based hybrid framework of game theory and particle swarm optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 105: 206-217.
- [17] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [18] 徐丽萍, 林俐. 基于学习曲线的中国风力发电成本发展趋势分析[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(3): 1-4.
XU Liping, LI Li. Study on the cost trends of wind power in china based on the learning curve[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, 24(3): 1-4.
- [19] 牛衍亮, 黄如宝, 常惠斌. 基于学习曲线的能源技术成本变化[J]. 管理工程学报, 2013, 27(3): 74-80.
NIU Yanliang, HUANG Rubao, CHANG Huibin. The change of energy technology cost based on learning curve[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2013, 27(3): 74-80.
- [20] 王帅. 发电商基于 Q-Learning 算法的日前市场竞价策略[J]. 能源技术经济, 2010, 22(3): 34-39.
WANG Shuai. Generators' bidding strategies in the day-ahead market based on Q-Learning algorithm[J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(3): 34-39.

收稿日期: 2015-11-24; 修回日期: 2016-01-25

作者简介:

黄 仙(1966-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模与决策, 系统综合评价与决策支持等;

郭 睿(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统的建模与分析, 可再生能源分析。Email: 759038821@qq.com

(编辑 姜新丽)