论文

基于古诺模型的风火电合作容量优化

刘连光, 刘鸿熹*, 刘自发, 陈为化, 周明

华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

* E-mail: siphon_flow@163.com

收稿日期: 2015-08-02; 接受日期: 2015-11-04; 网络出版日期: 2015-12-23

国家电网公司大电网重大专项课题(批准号: SGCC-MPLG019-2012)资助项目

摘要 在风火打捆直流外送系统中, 送端电网的风电场和火电厂属于不同的利益主体, 二者对电源容量的规划存在相互影响. 在电力市场环境下, 考虑我国现有的可再生能源政策以及风电场和火电机组的实际运行特性, 基于博弈理论分别建立了风力发电商和火力发电商之间, 采取合作与不合作两种策略下的利润模型, 来模拟风火发电商的决策行为. 当二者采取不合作策略时, 以各自利润最大化为目标, 建立古诺博弈模型, 得到双方通过预估对手的反应策略规划各自容量, 使己方获得最大利润的 Nash 均衡解; 当二者均采取合作策略进行容量规划时, 以双方总利润最大化为目标, 求取该方式下的最优规划容量, 根据己方策略变化给对方利润产生的变动定义了影响系数, 并据此给出了二者的利润分配方案. 应用该方法对一个算例进行了计算分析, 得出在风火打捆外送系统中, 风力发电商在博弈中处于主动地位, 火力发电商处于被动地位的结论. 研究工作及成果可作为参与新能源电源规划各方决策的依据.

关键词 风火打捆, 古诺模型, 博弈策略, 装机容量, 利润最大化, 影响系数, 利润分配

1 引言

在市场经济环境下, 追逐利润的最大化是各市场参与者的重要目标, 在电力系统的发电侧各发电商通过相互博弈赢得各自的最大收益. 随着新能源并网技术的快速发展, 风电消纳的技术问题逐渐减小, 而风电并网引起的利益矛盾成为亟需解决的问题. 目前我国大规模风电基地为了提高风电的利用率, 通常将风电与其他常规能源联合的方式输送^[1]. 我国西北地区风能和煤炭资源丰富, 水能资源贫乏, 风电难以就地消纳, 宜采用风电和火电打捆的方式

外送^[2,3]. 在风火打捆直流外送系统中, 送端电网的风电场和火电厂属于不同的利益主体, 彼此行为相互影响. 风火发电商双方之间的利益矛盾得不到有效的解决, 不仅影响电源建设参与者的利益与积极性, 还会影响电网和负荷的安全经济运行以及新能源相关政策法规的制定. 近年来, 随着大规模风电基地的建设, 尤其是建设的速度过快和基础问题研究的滞后, 风火发电商之间的利益问题得不到及时的解决, 对新能源的发展以及建设的影响已经显现. 为了促进新能源的可持续发展和兼顾风火发电商双方的利益, 保证二者的良性竞争与有序发展, 提出研究

引用格式: 刘连光, 刘鸿熹, 刘自发, 等. 基于古诺模型的风火电合作容量优化. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 467–474

Liu L G, Liu H X, Liu Z F, et al. Cooperation capacity optimization of wind power and thermal power based on Cournot model (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 467–474, doi: 10.1360/N092015-00136

二者合作容量优化.

在风火打捆系统中, 风火发电商双方基于自身利益考虑在电源容量规划问题上存在博弈行为. 目前研究电力市场中非合作博弈的模型主要有古诺(Cournot)模型和伯川德(Bertrand)模型^[4,5]. 其中古诺模型是由法国经济学家 Cournot 在 1838 年首次建立的, 在分析寡头市场竞争行为中起到很好的作用, 分析电力市场不同主体博弈行为时也有有效的作用. 该模型在发电侧的应用尤为广泛, 多用于研究发电商通过改变发电出力影响市场电价并最终影响收益的情形. 文献[6]利用古诺模型模拟寡头垄断的电力市场, 给出了在信息完全与信息不完全条件下多人博弈时该模型的 Nash 均衡解析解. 文献[7]结合电力市场实际情况, 给出了非线性反需求函数下电厂的静态古诺模型及古诺均衡的求解方法. 文献[8,9]给出了古诺均衡的求解方法, 其中文献[8]利用迭代的方法求解 Nash 均衡, 即在每次迭代中, 均固定其他发电商的投标, 计算所考察发电商的最优投标, 直到所有发电商的投标不再改变. 文献[9]提出了一种考虑输电线路约束的纯策略古诺模型均衡的求解方法. 上述文献围绕发电商发电运营阶段的竞价行为开展的研究工作, 证明了古诺模型适合解决不同发电主体间的博弈竞争问题.

当风火发电商参与市场竞争并且采取合作的策略时, 各方将获得更大的收益^[10], 但需要给出合理的利益分配方案^[11,12]. 文献[11]通过比较风电与火电在联合外送与独立外送模式下的利润水平, 提出按 Shapley 值法分配利润. 文献[12]针对风-光-储混合电力系统提出并分析比较了 4 种分配策略下合作参与方的合作强度. 在这些研究工作基础上, 本文提出基于古诺模型研究风火电合作容量的优化问题及求解的方法, 考虑我国现有的可再生能源政策以及风电场群和火电机组的实际运行特性、风电场和火电厂投资建设成本和风火电发电运行收益等多方面因素, 建立风火发电商的利润模型, 以双方的利润最大化为目标求取风火发电商不合作与合作两种策略下的最优规划容量, 对 2 种方式的总利润大小进行比较. 为了突出风火发电商决策对彼此收益的影响, 根据己方策略变化对对方利润的影响定义了影响系数, 并据此给出双方合作方式下的利润分配方案. 再通过算例验证利润模型、算法和分配方案, 得到 2 种方式下风火发电商双方的最优规划容量及最大利润.

本文风火发电商双方合作容量优化问题的研究成果, 以及新能源与常规能源博弈的分析对新能源的建设有重要的意义.

2 古诺模型 Nash 均衡的求解

设 $x \in [0, X] = A_1$, $y \in [0, Y] = A_2$, 函数 $f(x, y)$, $g(x, y)$ 在 $A_1 \times A_2$ 上连续, 且分别关于 x, y 为凹函数, 求同时满足: $\varphi_1(y) = \max_{x \in A_1} f(x, y)$, $\varphi_2(x) = \max_{y \in A_2} g(x, y)$ 取得最大值的点 (x, y) .

上述问题可以看成是双寡头古诺模型的一般形式. 不妨设 (x^*, y^*) 是满足上述条件的最大值点, 即有 $f(x^*, y^*) = \max_{x \in A_1} f(x, y^*)$ 和 $g(x^*, y^*) = \max_{y \in A_2} g(x^*, y)$, 称 (x^*, y^*) 为古诺模型的 Nash 均衡解.

若 (x^*, y^*) 为 Nash 均衡解, 则对于 $f(x, y)$, $g(x, y)$, x^* 和 y^* 为 $\max_{x \in A_1} f(x, y^*)$ 和 $\max_{y \in A_2} g(x^*, y)$ 最大化问题的解.

当 $f(x, y)$, $g(x, y)$ 同时满足一阶可导时, 方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

(1)式的解即为 Nash 均衡解析解.

当 $f(x, y)$, $g(x, y)$ 不同时满足一阶可导时, 可采取迭代的方法求取 Nash 均衡数值解. 迭代步骤如下:

任取 $x_0 \in A_1$, 给出允许误差 ε , 求取 y_1 , 使得

$$\max_{y \in A_2} g(x_0, y) = g(x_0, y_1);$$

求满足 $\max_{x \in A_1} f(x, y_1) = f(x_1, y_1)$ 的 x_1 , 并检验误差;

求满足 $\max_{y \in A_2} g(x_1, y) = g(x_1, y_2)$ 的 y_2 , 并检验误差;

重复上述步骤, 若满足 $|x_n - x_{n-1}| < \varepsilon$, $|y_n - y_{n-1}| < \varepsilon$, 则 (x_n, y_n) 为所求 Nash 均衡解.

需要注意, 当均衡解不唯一时, 在解析解求解过程中(1)式存在多个解; 同样地, 在数值解求解过程中, 给定不同的初始值, 迭代结果也可能不同. 因此, 在具体的古诺模型中需要找出各个均衡解及相应均衡状态下博弈双方的收益情况, 讨论均衡点的稳定性.

3 风火电容量优化方法

3.1 风火电容量优化原则

为促进新能源上网,《中华人民共和国可再生能源法》规定^[13],电网企业需全额收购其电网覆盖范围内的可再生能源,因此在风电火电打捆送出时应优先考虑风电的送出.在一定输电容量下,风电与火电打捆送出策略为:优先考虑风电送出,当风电与火电的总发电功率超出输电容量时,火电机组考虑降出力运行.当火电机组负荷率降低时,将损害火力发电商的利益,因此,在火电机组以最小技术出力运行时的风火电的总功率仍超出输电容量,则考虑风电场群弃风以使总的外送功率控制在输电容量之内.

设线路输电容量为 P_l ,风电场群装机容量为 P_w ,年持续出力特性为 $P_d(t)$,火电机组总装机容量为 P_t ,最小技术出力为 rP_t (r 为火电机组最小技术出力率),则风电的上网容量空间为 $P_l - rP_t$.显然,为尽可能多地接纳风电,应使 $P_w \geq P_l - rP_t$.同时,火力发电商为了维护自身利益,其装机容量应不超过线路输电容量,即有 $P_t \leq P_l$.

为提高风电的消纳电量,假设送端电源不参与受端电网调峰任务.在此条件下,图1给出了风电装机容量为 P_w ,火电机组总装机容量为 P_t 时,输电线路送端年送出电量的组成情况,其中 S_1 表示风电上网电量, S_2 表示风电场弃风电量, $S_2 + S_3$ 表示火电上网电量.

图1表明,在已知输电线路容量 P_l 及火电机组总装机容量 P_t 和最小技术出力率 r 时,增大风电装机容量 P_w 时,风电上网电量得到提高,供电收益增加,但

图1 风火电装机分别为 P_w 和 P_t 时输电线路年送出电量

是相应的弃风电量增大,投资建设成本及运行维护成本也会加大.因此,存在一个最优的风电装机容量,使得风力发电商利润最大;同样地,在已知输电线路容量 P_l 、火电机组最小技术出力率 r 及风电装机容量 P_w 时,增大火电机组的装机容量可以提高火电上网电量,增加供电收益,但是相应的投资建设成本及运行维护成本也会加大.因此,也存在一个最优的火电装机容量,使得火力发电商利润最大.为了争取更多的经济效益,风火发电商可以采取合作与不合作的方式进行容量规划.

3.2 风火发电商不合作时容量优化方法

选取1年为周期,以风电场群持续出力特性曲线表示风电场群输出功率的整体波动特性,综合考虑风火发电商供电收益、风力和火力发电相关设施建设成本以及风火电维护管理成本等因素,构建了能够反映风火发电商利润的装机容量优化目标函数:

$$\begin{aligned} \max N_j(P_w, P_t) &= R_j(P_w, P_t) - C_j(P_w, P_t) - O_j(P_w, P_t), \\ \text{s.t.} \begin{cases} P_w \geq P_l - rP_t, \\ P_t \geq P_l, \end{cases} & \quad j = w, t, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $j=w$ 表示风电场, $j=t$ 表示火电厂; $N_j(P_w, P_t)$ 为发电商一年内综合利润; $R_j(P_w, P_t)$ 为发电商年供电收益; $C_j(P_w, P_t)$ 为发电相关设施建设成本等年值; $O_j(P_w, P_t)$ 为年运行维护成本;

供电收益正比于上网电量,即

$$R_j(P_w, P_t) = p_j E_j(P_w, P_t), \quad (3)$$

式中, p_j 为风火电上网电价(元/MWh); $E_j(P_w, P_t)$ 为风火电上网电量(MWh),其计算式为

$$E_w(P_w, P_t) = (P_l - rP_t)t_1 + \int_{t_1}^{8760} P_d(t)dt, \quad (4)$$

$$E_t(P_w, P_t) = rP_t t_1 + \int_{t_1}^{t_2} (P_l - P_d(t))dt + P_t(8760 - t_2), \quad (5)$$

式中, t_1, t_2 满足 $P_d(t_1) = P_l - rP_t$, $P_d(t_2) = P_l - P_t$.由于函数 $P_d(t)$ 由 P_w 确定,记 $t_1 = t_1(P_w, P_t)$, $t_2 = t_2(P_w, P_t)$, 则

$$E_w(P_w, P_t) = (P_l - rP_t)t_1(P_w, P_t) + \int_{t_1(P_w, P_t)}^{8760} P_d(t)dt, \quad (6)$$

$$E_t(P_w, P_t) = rP_t t_1(P_w, P_t) + \int_{t_1(P_w, P_t)}^{t_2(P_w, P_t)} (P_t - P_d(t)) dt + P_t(8760 - t_2(P_w, P_t)). \quad (7)$$

发电相关设施建设成本等年值 $C_j(P_w, P_t)$ 计算式为

$$C_j(P_w, P_t) = c_j P_j \frac{i_j(1+i_j)^{n_j}}{(1+i_j)^{n_j} - 1}, \quad (8)$$

式中, c_j 为发电相关设施单位容量建设成本(元/MW); i_j 为贴现率; n_j 为发电厂使用寿命(年).

风电场年运行维护成本 $O_j(P_w, P_t)$ 计算式为

$$O_w(P_w, P_t) = o_w P_w, \quad (9)$$

$$O_t(P_w, P_t) = o_t P_t + o_e E_t(P_w, P_t) + o_c M(P_w, P_t), \quad (10)$$

式中, o_w , o_t 分别为风电场和火电厂单位容量年维护与管理成本(元/MW); o_e 为火电厂单位电量污染物处理成本(元/MWh); o_c 为煤炭价格(元/t); $M(P_w, P_t)$ 为火电厂年煤耗量(t), 其计算式为

$$M(P_w, P_t) = Q(r) r P_t t_1 + \int_{t_1}^{t_2} (P_t - P_d(t)) Q \left(\frac{P_t - P_d(t)}{P_t} \right) dt + Q(1) P_t (8760 - t_2), \quad (11)$$

式中, Q 为火电机组供电煤耗特性(t/MWh), 计算式为

$$Q(P) = a + bP + cP^2, \quad (12)$$

式中, P 为火电机组出力率, a , b , c 为火电机组供电煤耗特性参数.

由此可见当风火发电商采取不合作的方式进行电源规划决策时, 双方的最优装机容量彼此影响, 需要根据对方的策略拟定己方决策. 风火发电商最优容量的古诺动态博弈均衡过程如图 2 所示.

假定风火发电商的利润函数一阶可导, 当双方边际利润均为 0 时, 风火发电商各自的利润取得最大值, 此时风火电装机容量达到最优. 即有

$$\begin{cases} \frac{\partial N_w(P_w, P_t)}{\partial P_w} = 0, \\ \frac{\partial N_t(P_w, P_t)}{\partial P_t} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

图 2 风火发电商古诺动态博弈均衡过程图

可求得均衡解 (P_w^*, P_t^*) , 此时风火发电商的利润分别为 $N_w(P_w^*, P_t^*)$, $N_t(P_w^*, P_t^*)$.

需要注意的是, (13)式只是 Nash 均衡的必要条件, 当所给方程组的解不唯一时, 需要找出各个均衡解及相应均衡解下博弈双方的收益情况, 讨论其稳定性.

3.3 风火发电商合作时容量优化与利益分配方法

当风火发电商采取合作的方式进行容量规划时, 最优容量应使风火发电商的总利润最大. 目标函数为

$$\begin{aligned} & \max \{N_w(P_w, P_t) + N_t(P_w, P_t)\}, \\ & \text{s.t.} \begin{cases} P_w \geq P_t - rP_t, \\ P_t \geq P_t. \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

当总的边际利润均为 0 时, 风火发电商总利润最

大, 此时风火电装机容量达到最优. 即有

$$\begin{cases} \frac{\partial(N_w(P_w, P_t) + N_t(P_w, P_t))}{\partial P_w} = 0, \\ \frac{\partial(N_w(P_w, P_t) + N_t(P_w, P_t))}{\partial P_t} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

可求得合作解 $(\bar{P}_w, \bar{P}_t)$, 此时风火发电商的利润分别为 $N_w(\bar{P}_w, \bar{P}_t)$, $N_t(\bar{P}_w, \bar{P}_t)$. 如果定义合作剩余 CS 如下:

$$CS = (N_w(\bar{P}_w, \bar{P}_t) + N_t(\bar{P}_w, \bar{P}_t)) - (N_w(P_w^*, P_t^*) + N_t(P_w^*, P_t^*)) \quad (16)$$

并有 $CS \geq 0$.

在电源容量规划博弈中, 风力发电商的策略集为{不合作, 合作}, 对应规划容量为 $\{P_w^*, \bar{P}_w\}$; 火力发电商的策略集为{不合作, 合作}, 对应规划容量为 $\{P_t^*, \bar{P}_t\}$.

若双方合作情况下的利润不可转移, 则收益矩阵 (N_w, N_t) 为

	不合作	合作
不合作	$(N_w(P_w^*, P_t^*), N_t(P_w^*, P_t^*))$	$(N_w(P_w^*, \bar{P}_t), N_t(P_w^*, \bar{P}_t))$
合作	$(N_w(\bar{P}_w, P_t^*), N_t(\bar{P}_w, P_t^*))$	$(N_w(\bar{P}_w, \bar{P}_t), N_t(\bar{P}_w, \bar{P}_t))$

由 Nash 均衡解的定义可知 $N_w(P_w^*, P_t^*) \geq N_w(\bar{P}_w, P_t^*)$, 且 $N_t(P_w^*, P_t^*) \geq N_t(P_w^*, \bar{P}_t)$, 即对于风火发电商而言, 合作策略均不是其最优纯策略. 若 $N_w(P_w^*, \bar{P}_t) \geq N_w(\bar{P}_w, \bar{P}_t)$, 则风力发电商的最优纯策略为不合作, 此时火力发电商亦选择不合作策略; 同理, 若 $N_t(\bar{P}_w, P_t^*) \geq N_t(\bar{P}_w, \bar{P}_t)$, 则火力发电商的最优纯策略为不合作, 此时风力发电商亦选择不合作策略, 博弈结果为(不合作, 不合作).

若双方经过协商达成协议, 使得合作情况下的利润可转移, 则要使博弈均衡结果为双方采取合作策略, 应使合作结果满足个体理性, 即采取合作策略后双方利润均不小于采取不合作策略时的利润, 有

$$\begin{cases} \Delta N_w = N_w(\bar{P}_w, \bar{P}_t) + \Delta N - N_w(P_w^*, P_t^*) \geq 0, \\ \Delta N_t = N_t(\bar{P}_w, \bar{P}_t) - \Delta N - N_t(P_w^*, P_t^*) \geq 0, \\ CS = \Delta N_w + \Delta N_t, \end{cases} \quad (17)$$

式中, ΔN 为双方合作情况下的转移利润. $\Delta N \geq 0$, 表示火力发电商向风力发电商转移利润, 反之风力发电商向火力发电商转移利润.

由收益矩阵可看出己方的不同策略会对对方的收益产生相应影响. 定义火力发电商采取不合作策略时, 风力发电商采取不同策略对火力发电商利润的影响系数为 $I_{wt}(P_t^*)$, 其计算式为

$$I_{wt}(P_t^*) = \frac{|N_t(P_w^*, P_t^*) - N_t(\bar{P}_w, P_t^*)|}{\min(N_t(P_w^*, P_t^*), N_t(\bar{P}_w, P_t^*))} \quad (18)$$

类似可得 $I_{wt}(\bar{P}_t)$, $I_{tw}(P_w^*)$, $I_{tw}(\bar{P}_w)$ 的计算式及风火发电商不同策略下利润的总影响系数 I_{wt} , I_{tw} , 计算式为

$$I_{wt} = I_{wt}(P_t^*) + I_{wt}(\bar{P}_t), \quad (19)$$

$$I_{tw} = I_{tw}(P_w^*) + I_{tw}(\bar{P}_w). \quad (20)$$

要使双方所达成的合作协议具有约束力, 可将合作剩余 CS 按风火发电商对对方利润的总影响系数进行分配, 即

$$\Delta N_w : \Delta N_t = I_{wt} : I_{tw}. \quad (21)$$

联立(17), (21)式可得

$$\begin{cases} \Delta N_w = \frac{I_{wt}}{I_{wt} + I_{tw}} CS, \\ \Delta N_t = \frac{I_{tw}}{I_{wt} + I_{tw}} CS. \end{cases} \quad (22)$$

(22)式即为风火发电商均采取合作策略下的合作剩余分配方法.

4 算例分析

设某大型风电基地采用风电和火电打捆的方式经 ± 800 kV 特高压直流线路向外输电, 直流线路额定输送容量为 $P_t = 8000$ MW. 风电出力特性参考文献[14], 给定风电场和火电厂相关参数如下.

配套火电机组规格相同, 最小技术出力为额定出力的 $r = 50\%$, 供电煤耗特性 $Q(P) = 0.32$ t/MWh.

风火电上网电价分别为 $p_w = 560$ 元/MWh, $p_t = 380$ 元/MWh; 单位供电容量建设成本 $c_w = 750$ 万元/MW, $c_t = 350$ 万元/MW, 贴现率 $i_w = i_t = 0.1$; 使用寿命为

$n_w=n_t=25$ 年; 单位容量维护与管理成本 $o_w=25$ 万元/MW, $o_t=30$ 万元/MW, 火电厂污染物处理成本 $o_f=30$ 元/MWh, 煤炭价格 $o_c=700$ 元/t.

根据上述数据, 由(13)式得到风火发电商不合作策略时 Nash 均衡点只有一个, 有最优规划容量 $P_w^*=6756.0$ MW, $P_t^*=6231.0$ MW, 双方利润如表 1 所示. 计算火电初始装机容量为 0 时风火发电商的古诺动态博弈过程如图 3 所示.

当风火发电商采取合作策略进行容量规划时, 由(15)式计算得到双方规划容量 $\bar{P}_w=5726.2$ MW, $\bar{P}_t=6358.6$ MW, 双方利润见表 2.

由表 1 和 2 可知, 不合作策略下风电的最优装机容量比采取合作策略时要大, 风力发电商的利润也更大, 而火电则相反. 这说明, 在现有政策下风火打捆系统中的风电具有更强的竞争力, 但是风电竞争的存在却使总体利润降低.

根据风火发电商合作与不合作策略下的规划容量可以求得 $N_w(\bar{P}_w, P_t^*)=10.305$ 亿元, $N_t(\bar{P}_w, P_t^*)=21.222$ 亿元, $N_w(P_w^*, \bar{P}_t)=11.325$ 亿元, $N_t(P_w^*, \bar{P}_t)=19.163$ 亿元. 综合表 1 和 2 可得合作剩余 $CS=0.922$

图 3 (网络版彩图)火电初始装机为 0 时风火发电商的古诺动态博弈

表 1 风火发电商不合作时最优容量优化结果

发电商	最优容量 (MW)	送出电量 (GWh)	利润 (亿元)	总利润 (亿元)
风力发电商	6756.0	15020	11.483	30.660
火力发电商	6231.0	49095	19.177	

表 2 风火发电商合作时最优容量优化结果

发电商	最优容量 (MW)	送出电量 (GWh)	利润 (亿元)	总利润 (亿元)
风力发电商	5726.2	12840	10.344	31.582
火力发电商	6358.6	51424	21.238	

亿元, 风火发电商采取不同策略下的收益矩阵如下:

	不合作	合作
不合作	(11.483, 19.177)	(11.325, 19.163)
合作	(10.305, 21.222)	(10.344 + ΔN, 21.238 - ΔN)

若 $\Delta N = 0$, 即利润不可转移, 由收益矩阵可知, 当双方采取合作策略时, 火力发电商的利润得到增加, 而风力发电商的利润却出现减少, 因此风力发电商将采取不合作策略, 此时火力发电商的优策略为不合作策略, 较之采取合作策略利润增加 0.014 亿元, 增加幅度为 0.073%. 此外, 分析: 已知一方策略情况下, 另一方采取优策略较之劣策略对双方利润的影响情况见表 3 和 4.

由表 3 可以看出, 针对风力发电商的不同策略, 火力发电商采取优策略较之劣策略时, 对风火发电商双方的利润均产生较小影响, 其中火力发电商采取优策略较之劣策略对风力发电商利润的总影响系数 $I_w=1.773\%$. 而由表 4 可知, 针对火力发电商的不策略, 风力发电商采取优策略较之劣策略时, 对风火发电商双方的利润均产生较大影响, 其中风力发电商采取优策略较之劣策略对火力发电商利润的总影响系数 $I_w=21.492\%$. 产生此种结果的原因是: 在风火电联合外送系统中, 风电具有上网的优先权, 处于主动地位, 而火电只能配合风电外送, 处于被动地位.

若 $\Delta N \neq 0$, 即利润可转移, 由(21)和(22)式可得风火发电商达成合作协议后双方的利润分配方案见表 5.

5 结论

在容量规划的合作与不合作决策中, 风力发电

表 3 火力发电商采取优策略较劣策略对双方利润的影响

风力发电商策略	火力发电商利润增量 (亿元)	火力发电商利润增幅 (%)	风力发电商利润增量 (亿元)	风力发电商利润增幅 (%)
不合作	0.014	0.073	0.158	1.395
合作	0.016	0.075	0.039	0.378

表 4 风力发电商采取优策略较劣策略对双方利润的影响

火力发电商策略	风力发电商利润增量 (亿元)	风力发电商利润增幅 (%)	火力发电商利润增量 (亿元)	火力发电商利润增幅 (%)
不合作	1.178	11.431	-2.045	-10.664
合作	0.981	9.484	-2.075	-10.828

表 5 风火发电商达成合作协议后双方利润分配方案

发电商	双方不合作策略下利润 (亿元)	己方对对方利润的总影响系数 (%)	合作剩余分配 (亿元)	双方合作策略下利润 (亿元)
风力发电商	11.483	21.492	0.852	12.335
火力发电商	19.177	1.773	0.070	19.247

商的决策对火力发电商的利润影响较大, 而火力发电商的决策对风力发电商的利润影响较小, 这是因为风电具有上网的优先权, 而火电只能配合风电外送.

风火发电商双方采取合作策略下的总利润高于不合作策略下的总利润, 但是会出现火力发电商利润增加, 风力发电商利润受损的现象. 在利润不可转移的情况下, 双方不能达成合作意愿; 而在利润可转移的情况下, 合理的利润分配方案能使合作形成.

根据风火发电商双方决策对对方利润的影响系数分配合作剩余, 能使合作更为稳定, 其结果为风力发电商所得合作剩余较大, 而火力发电商所得较小.

本文的模型、算法以及结论可供作能源规划参考, 也可作为参与新能源电源建设的各方提供决策依据, 对保证新能源合理发展具有理论意义和实用价值. 在更多参与者的容量优化问题上, 如果各方收益函数满足一阶条件只有一个解时, 文中所提优化及收益分配方法同样适用. 但需要说明的是, 本文在构建风火发电商的利润模型时做了适当简化, 假定在电源的使用寿命期内建设成本和上网电价等参数是不变的, 这可能会对实际的结果产生一定计算误差, 针对这些不确定性的因素对模型及算法的影响还有待进一步研究.

参考文献

1 吕朝阳, 张丹庆, 李怀玉. 我国风电大规模外送协同运行方式研究. 水电能源科学, 2012, 30: 202–205

2 徐玮, 杨玉林, 李政光, 等. 甘肃酒泉大规模风电参与电力市场模式及其消纳方案. 电网技术, 2010, 34: 71–77

3 汪宁渤, 王建东, 何世恩. 酒泉风电跨区消纳模式及其外送方案. 电力系统自动化, 2011, 35: 82–89

4 刁勤华, 林济铿, 倪以信, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用. 电力系统自动化, 2001, 25: 19–23

5 刁勤华, 林济铿, 倪以信, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用. 电力系统自动化, 2001, 25: 13–18

6 袁智强, 侯志俭, 蒋传文, 等. 电力市场古诺模型的均衡分析. 电网技术, 2003, 27: 6–9

7 张宇波, 罗先觉, 薛钧义. 非线性市场需求下机组优化出力的自适应动态古诺模型. 中国电机工程学报, 2003, 23: 80–84

8 Borenstein S, Bushnell J. An empirical analysis of the potential for market power in California's electricity industry. J Ind Econ, 1999, 47: 285–323

9 余贻鑫, 陈晓明. 考虑输电约束的古诺均衡求解方法. 中国电机工程学报, 2005, 25: 68–72

10 梅生伟, 王莹莹, 刘锋. 风-光-储混合电力系统的博弈论规划模型与分析. 电力系统自动化, 2011, 35: 13–19

11 谭忠富, 宋艺航, 张会娟, 等. 大规模风电与火电联合外送体系及其利润分配模型. 电力系统自动化, 2013, 37: 63–70

12 王莹莹, 梅生伟, 刘锋. 混合电力系统合作博弈规划的分配策略研究. 系统科学与数学, 2012, 32: 418–428

13 华文, 徐政. 风电火电打捆送出时的输电容量优化方法. 电力系统保护与控制, 2012, 40: 121–125

14 辛颂旭, 白建华, 郭雁珩. 甘肃酒泉风电特性研究. 能源技术经济, 2010, 22: 16–20

Cooperation capacity optimization of wind power and thermal power based on Cournot model

LIU LianGuang, LIU HongXi, LIU ZiFa, CHEN WeiHua & ZHOU Ming

State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

In wind-thermal-bundled DC transmission system, plants of wind power and thermal power in the sending end, which have mutual influence on the planning of power capacity, belong to different stakeholders. This paper takes the existing renewable energy policy and the operation characteristics of wind farm and thermal generator into account, and the profit models of wind power supplier and thermal power supplier are respectively established according to different strategies of cooperation or non-cooperation based on

game theory, to simulate the decision making of the two power suppliers. When the two both take non-cooperation strategy, a Cournot model which assumes that one can develop its optimal capacity planning strategy through estimating the rival's response is established to obtain the Nash equilibrium, so as to maximize their profits respectively. Besides, the objective changes into maximizing the suppliers' total profits when they choose cooperation strategy, and the optimal capacity is calculated. Meanwhile, the influence coefficient which can illustrate the variation of one's profit influenced by the changing of the other's strategy is introduced, and based on which the profit distribution plan is presented. Moreover, a case is carried out for a wind-thermal-bundled DC transmission system, and the result shows that wind power supplier holds the active position in the game while the thermal power supplier holds the passive position. In addition, the study of this paper can provide the participants of new energy capacity planning with a basis to make decision.

wind-thermal-bundled, Cournot model, game strategy, installed capacity, profit-maximization, influence coefficient, profit distribution

doi: 10.1360/N092015-00136