



新能源接入下风火网三方非对称进化博弈分析

刘连光, 刘鸿熹*, 刘自发, 陈为化

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: 2015-08-05; 接受日期: 2015-10-19; 网络出版日期: 2015-11-18

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

摘要 在电力市场环境下, 风电企业、火电企业和电网企业属于不同的利益主体, 三方对新能源的开发利用存在利益冲突, 研究风火网三方之间的利益联系, 不仅关系参与风电消纳的各方利益解决, 还能为制定电力市场结构与竞争规则提供支撑。基于有限理性假设, 应用进化博弈理论分析风火网三方的博弈态势, 依据收益矩阵建立了三群体 $2 \times 2 \times 2$ 非对称进化博弈的复制动态系统, 对风火网三方动态行为进行模拟, 求取了系统各个平衡点满足渐近稳定性的条件。分析了在政府对新能源并网不进行干预时的进化结果, 并给出了政府通过出台新能源相关政策改变风火网三方博弈收益, 使得三者稳定于期望状态的条件。研究结论可供制定电力市场结构与竞争规则参考。

关键词
风电
进化博弈
进化稳定策略
复制动态
渐近稳定

1 引言

风电等新能源的大规模开发利用能够有效解决能源需求问题, 但是受到自身技术及各方利益矛盾的影响, 新能源并网存在许多障碍^[1]。在电力市场环境下, 新能源的开发利用成本较高, 相较于常规能源, 风电的市场竞争力不足; 风电接入电网使得火电等常规能源的收益减少, 火电企业不愿意主动避让风电送出; 另外, 风电出力的间歇性与随机性会对电力系统的安全稳定运行产生不利影响^[2,3], 导致电网企业参与风电消纳的积极性不高。这些因素制约风电等新能源的发展, 影响电力市场化的运作。研究风火网三方之间的利益联系, 不仅关系到参与风电消纳的各方利益解决, 还可为政策制定者设计良好的电力市场结构与竞争规则提供参考。

风电并网问题实际上是一个常规能源发电企业、

新能源发电企业与电网企业三个群体之间的多方博弈。目前, 已有学者运用博弈论研究新能源开发利用问题。文献[4,5]运用合作博弈理论解决了含新能源的多方收益分配问题, 文献[6]利用古诺模型求解了发电厂获利最大的出力策略。上述研究是建立在完全理性人假定基础上的。事实上, 博弈参与者由于信息获取并不完备, 自身行为受习惯与偏好等因素的影响, 在策略选择时并不总是完全理性的^[7]。因此, 传统博弈论将参与者假设为完全理性人分析各方博弈行为与实际情况并不相符。为解决这一问题, 基于有限理性的进化博弈论被提出^[8]。

进化博弈论立足于有限理性的个体, 把群体作为研究对象, 并认为群体行为是通过个体之间模仿、学习和交流等动态过程来实现的。这一理论能很好地描绘出群体行为的变化趋势并准确地预测个体的群体行为。文献[9]以发电侧市场为例说明了进化博

引用格式: 刘连光, 刘鸿熹, 刘自发, 等. 新能源接入下风火网三方非对称进化博弈分析. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1297–1303
Liu L G, Liu H X, Liu Z F, et al. Analysis of tripartite asymmetric evolutionary game among wind power enterprises, thermal power enterprises and power grid enterprises under new energy resources integrated (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1297–1303, doi: 10.1360/N092015-00244

博弈论在电力市场中的应用。文献[10]研究了可再生能源发电企业与电网企业的进化过程及进化稳定的影响因素,指出政府应当建立合理的政策,引导可再生能源良性发展。文献[11]将进化博弈与系统动力学相结合,对环境污染问题中的非对称进化博弈做了均衡稳定性分析。文献[12]分析了两群体 3×3 对称进化博弈的稳定性情况。上述文献围绕不同群体间的利益冲突展开研究,证实了进化博弈理论在解决此类问题的适用性。但目前国内研究大多局限于双群体的分析,在三群体非对称进化博弈领域鲜有涉及。文献[13]建立了三群体非对称进化博弈模型,并讨论了三群体各自情况下的平衡点及渐近稳定条件。

本文利用进化博弈理论的思想和方法,分析风电企业、火电企业与电网企业之间的博弈态势,根据三方收益矩阵构建三群体 $2\times 2\times 2$ 非对称进化博弈的复制动态系统,对风火网三方动态行为进行模拟,完整地讨论了系统各个可能的平衡点,求取了使平衡点满足渐近稳定性的条件。通过分析政府对新能源并网不干预情况下风火网三方收益参数的大小关系,得出此时系统的渐近稳定状态并不能促进风电的发展。最后分析进化稳定的影响因素,探索了政府引导新能源健康发展的决策机制。

2 进化稳定策略与复制动态

进化博弈理论来自达尔文的生物进化理论,认为群体在进化的过程中通过变异产生多样性,并根据选择使获得更高收益的个体保留下来。相应地形成了进化博弈论的2个基本要素:进化稳定策略(evolutionary stable strategy, ESS)和复制动态(replicator dynamics, RD)。

2.1 多群体进化稳定策略

ESS表示若群体中绝大多数个体选择进化稳定策略,那么选择变异策略的较小群体就不可能侵入到这个群体,其中多群体进化稳定策略的定义为^[14]:在 n 个群体进化博弈中,称策略组合 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n) \in \Sigma$ 为进化稳定的策略组合ESS,如果对于任何 $Y \in \Sigma$, $Y \neq X$,存在 $0 < \varepsilon_Y < 1$,使对任何 $0 < \varepsilon < \varepsilon_Y$ 和 $S = \varepsilon Y + (1-\varepsilon)X$,存在 i ,使

$$E_i(X_i, S_{-i}) > E_i(Y_i, S_{-i}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中, $E_i(X_i, S_{-i})$, $E_i(Y_i, S_{-i})$ 表示在第*i*个群体分别采用

策略组合 X_i 和 Y_i ,其余群体采用策略组合 S_{-i} 时的期望收益。

2.2 复制动态

1980年,Selten^[15]通过引入角色限制行为(role conditioned behavior)把群体分为单群体与多群体,不同群体根据个体可供选择的纯策略集不同来划分。为了表征种群通过模仿和学习使自身规模调整的反应速度引入复制动态的概念。复制动态假定在群体动态调整过程中,群体中的个体会选择在上一期博弈中获得较高支付的决策。因此可用某一特定策略在一个种群中被采用的比例或频率的动态微分方程来描述,其中多群体复制动态微分方程为

$$\frac{dx_i^j}{dt} = [f(s_i^j, x) - f(x_i, x_{-i})]x_i^j, \quad (2)$$

式中,下标*i*($i=1, 2, \dots, n$)表示第*i*个群体,其中*n*表示有*n*个群体; x_i^j 表示第*i*个群体中选择第*j*($j=1, 2, \dots, N_i$)个纯策略的个体数占该群体总数的百分比; x_i 表示群体*i*在某时刻所处的状态, x_{-i} 表示第*i*个群体以外的其他群体在某时刻所处的状态; s_i^j 表示群体*i*中个体行为集中的第*j*个纯策略; x 表示混合群体的混合策略组合, $f(s_i^j, x)$ 表示混合群体状态为*x*时群体*i*中个体选择纯策略*s_i^j*时所能得到的期望收益; $f(x_i, x_{-i})$ 表示混合群体的平均收益。

对于多群体复制动态的渐近稳定性有定理1^[14]:多群体的进化稳定策略与其复制动态系统的渐近稳定状态等价。

3 风火网三方进化博弈模型

3.1 风火网三方复制动态系统

在三群体进化博弈模型中,风火网三方分别用 W, T, G 表示。风电企业的策略为与火电协作送出 W_1 和不协作送出 W_2 ,记为 $S_W=\{W_1, W_2\}$,选择 W_1, W_2 的概率分别为 $x, 1-x$;火电企业的策略为与风电协作送出 T_1 和不协作送出 T_2 ,记为 $S_T=\{T_1, T_2\}$,选择 T_1, T_2 的概率分别为 $y, 1-y$;电网企业的策略为积极消纳风电 G_1 和消极消纳风电 G_2 ,记为 $S_G=\{G_1, G_2\}$,选择 G_1, G_2 的概率分别为 $z, 1-z$ 。由此假定三群体 $2\times 2\times 2$ 非对称进化博弈收益矩阵如图1所示。

$$\begin{array}{ll}
 \text{(a)} & \begin{matrix} T \\ y & 1-y \\ T_1 & T_2 \end{matrix} \\
 W & \begin{matrix} x & W_1 \begin{bmatrix} (w_1, t_1, g_1) & (w_2, t_2, g_2) \\ (w_3, t_3, g_3) & (w_4, t_4, g_4) \end{bmatrix} \\ 1-x & W_2 \end{matrix} \\
 & \begin{matrix} T \\ y & 1-y \\ T_1 & T_2 \end{matrix} \\
 \text{(b)} & \begin{matrix} x & W_1 \begin{bmatrix} (w_5, t_5, g_5) & (w_6, t_6, g_6) \\ (w_7, t_7, g_7) & (w_8, t_8, g_8) \end{bmatrix} \\ 1-x & W_2 \end{matrix}
 \end{array}$$

图 1 G 选择(a)策略 G_1 和(b)策略 G_2 时三方进化博弈收益矩阵

结合(2)式与收益矩阵可得风火网三方的复制动态方程为

$$\left\{
 \begin{aligned}
 W(x) &= \frac{dx}{dt} = x(E_{W_1} - \overline{E_W}) \\
 &= x(1-x)[(w_1 - w_2 - w_3 + w_4 - w_5 \\
 &\quad + w_6 + w_7 - w_8)yz \\
 &\quad + (w_5 - w_6 - w_7 + w_8)y + (w_2 - w_4 \\
 &\quad - w_6 + w_8)z + (w_6 - w_8)]; \\
 T(y) &= \frac{dy}{dt} = y(E_{T_1} - \overline{E_T}) \\
 &= y(1-y)[(t_1 - t_2 - t_3 + t_4 - t_5 + t_6 \\
 &\quad + t_7 - t_8)xz \\
 &\quad + (t_5 - t_6 - t_7 + t_8)x + (t_3 - t_4 - t_7 + t_8)z \\
 &\quad + (t_7 - t_8)]; \\
 G(z) &= \frac{dz}{dt} = z(E_{G_1} - \overline{E_G}) \\
 &= z(1-z)[(g_1 - g_2 - g_3 + g_4 - g_5 \\
 &\quad + g_6 + g_7 - g_8)xy \\
 &\quad + (g_2 - g_4 - g_6 + g_8)x + (g_3 - g_4 \\
 &\quad - g_7 + g_8)y + (g_4 - g_8)],
 \end{aligned} \tag{3}
 \right.$$

式中, E_{W_1} , E_{T_1} , E_{G_1} 分别表示风电企业、火电企业和电网企业采取策略 W_1 , T_1 , G_1 所能得到的期望收益; $\overline{E_W}$, $\overline{E_T}$, $\overline{E_G}$ 分别表示三者采取混合策略 S_W , S_T , S_G 所得到的平均收益.

若记

$$\left\{
 \begin{aligned}
 w(y, z) &= (w_1 - w_2 - w_3 + w_4 - w_5 + w_6 + w_7 - w_8)yz \\
 &\quad + (w_5 - w_6 - w_7 + w_8)y \\
 &\quad + (w_2 - w_4 - w_6 + w_8)z \\
 &\quad + (w_6 - w_8); \\
 t(x, z) &= (t_1 - t_2 - t_3 + t_4 - t_5 + t_6 + t_7 - t_8)xz \\
 &\quad + (t_5 - t_6 - t_7 + t_8)x \\
 &\quad + (t_3 - t_4 - t_7 + t_8)z \\
 &\quad + (t_7 - t_8); \\
 g(x, y) &= (g_1 - g_2 - g_3 + g_4 - g_5 + g_6 + g_7 - g_8)xy \\
 &\quad + (g_2 - g_4 - g_6 + g_8)x \\
 &\quad + (g_3 - g_4 - g_7 + g_8)y \\
 &\quad + (g_4 - g_8),
 \end{aligned} \tag{4}
 \right.$$

结合(3)和(4)式可将风火网三方的复制动态系统记为

$$\left[\begin{array}{c} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} x(1-x)w(y, z) \\ y(1-y)t(x, z) \\ z(1-z)g(x, y) \end{array} \right]. \tag{5}$$

由(5)式可得, 系统平衡点满足方程

$$\left\{
 \begin{aligned}
 x(1-x)w(y, z) &= 0, \\
 y(1-y)t(x, z) &= 0, \\
 z(1-z)g(x, y) &= 0.
 \end{aligned} \tag{6}
 \right.$$

3.2 复制动态系统渐近稳定性分析

根据李雅普洛夫稳定性理论^[16], 系统在平衡点处的渐近稳定性可通过分析系统雅可比矩阵 J 的特征值得出.

(5)式所描述系统的雅可比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)w(y, z) & x(1-x)\frac{\partial w(y, z)}{\partial y} & x(1-x)\frac{\partial w(y, z)}{\partial z} \\ y(1-y)\frac{\partial t(x, z)}{\partial x} & (1-2y)t(x, z) & y(1-y)\frac{\partial t(x, z)}{\partial z} \\ z(1-z)\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} & z(1-z)\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} & (1-2z)g(x, y) \end{bmatrix}. \tag{7}$$

观察方程(6)式的结构特点, 复制动态系统平衡点的求取及平衡状态的渐近稳定性判定可分为以下 4 种情况讨论.

$$(1) \text{ 若 } \begin{cases} x(1-x)=0 \\ y(1-y)=0 \\ z(1-z)=0 \end{cases}, \text{ 则有 } \begin{cases} x=0 \text{ 或 } 1 \\ y=0 \text{ 或 } 1 \\ z=0 \text{ 或 } 1 \end{cases}, \text{ 分别记为}$$

$E_1(0, 0, 0), E_2(0, 0, 1), E_3(0, 1, 0), E_4(0, 1, 1), E_5(1, 0, 0), E_6(1, 0, 1), E_7(1, 1, 0), E_8(1, 1, 1)$ 共 8 个平衡状态.

以 $E_8(1, 1, 1)$ 为例讨论使其满足渐近稳定的条件.

系统在平衡点 $(1, 1, 1)$ 处的雅可比矩阵为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} w_3 - w_1 & & \\ & t_2 - t_1 & \\ & & g_5 - g_1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

矩阵 \mathbf{J} 的特征值为 $\lambda_1 = w_3 - w_1, \lambda_2 = t_2 - t_1, \lambda_3 = g_5 - g_1$. 若满足 $w_3 < w_1, t_2 < t_1, g_5 < g_1$, 则有 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 均小于 0, 此时 $E_8(1, 1, 1)$ 是渐近稳定的.

同理可得在其余 7 个平衡点处的渐近稳定条件. 表 1 给出了各平衡点渐近稳定的条件.

$$(2) \text{ 若 } \begin{cases} w(y, z)=0 \\ y(1-y)=0, \text{ 假定方程组存在解 } (x_0, y_0, z_0), \\ z(1-z)=0 \end{cases}$$

且 $x_0, y_0, z_0 \in [0, 1]$, 则有

$$\begin{cases} w(y_0, z_0)=0, \\ y_0(1-y_0)=0, \\ z_0(1-z_0)=0. \end{cases} \quad (9)$$

将(9)式代入(7)式, 得系统在平衡状态 (x_0, y_0, z_0) 处的雅可比矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & x_0(1-x_0)A_{xy}^{(0)} & x_0(1-x_0)A_{xz}^{(0)} \\ 0 & (1-2y_0)t(x_0, z_0) & 0 \\ 0 & 0 & (1-2z_0)g(x_0, y_0) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中, $A_{xy}^{(0)} = \frac{\partial w(y, z)}{\partial y} \Big|_{(x_0, y_0, z_0)}$, $A_{xz}^{(0)} = \frac{\partial w(y, z)}{\partial z} \Big|_{(x_0, y_0, z_0)}$.

表 1 系统平衡点的稳定条件

平衡点	渐近稳定条件
$E_1(0, 0, 0)$	$w_6 < w_8, t_7 < t_8, g_4 < g_8$
$E_2(0, 0, 1)$	$w_2 < w_4, t_3 < t_4, g_8 < g_4$
$E_3(0, 1, 0)$	$w_5 < w_7, t_8 < t_7, g_3 < g_7$
$E_4(0, 1, 1)$	$w_1 < w_3, t_4 < t_3, g_7 < g_3$
$E_5(1, 0, 0)$	$w_8 < w_6, t_5 < t_6, g_2 < g_6$
$E_6(1, 0, 1)$	$w_4 < w_2, t_1 < t_2, g_6 < g_2$
$E_7(1, 1, 0)$	$w_7 < w_5, t_6 < t_5, g_1 < g_5$
$E_8(1, 1, 1)$	$w_3 < w_1, t_2 < t_1, g_5 < g_1$

显然, 矩阵 \mathbf{J} 有特征值 $\lambda=0$, 由此可知, 系统在平衡状态 (x_0, y_0, z_0) 处不满足渐近稳定.

事实上, 方程组 $\begin{cases} w(y, z)=0 \\ y(1-y)=0 \\ z(1-z)=0 \end{cases}$ 是无解的, 因为此方

程组含有 3 个独立方程, 而未知变量只有 2 个. 假设方程组 $\begin{cases} y(1-y)=0 \\ z(1-z)=0 \end{cases}$ 成立, 则有 $\begin{cases} y=0 \\ z=0 \end{cases}, \begin{cases} y=1 \\ z=0 \end{cases}, \begin{cases} y=0 \\ z=1 \end{cases}$,

$\begin{cases} y=1 \\ z=1 \end{cases}$ 4 组可能解, 将各组解代入(4)式中 $w(y, z)$ 得到

$w(0,0)=w_6-w_8, w(0,1)=w_2-w_4, w(1,0)=w_5-w_7, w(1,1)=w_1-w_3$ 与 $w(y, z)=0$ 矛盾, 方程组无解, 系统不存在平衡状态.

类似可得, 当 $\begin{cases} x(1-x)=0 \\ t(x, z)=0 \end{cases}$ 或 $\begin{cases} y(1-y)=0 \\ g(x, y)=0 \end{cases}$ 时, 方程

组亦无解, 系统不存在平衡状态.

(3) 若 $\begin{cases} w(y, z)=0 \\ t(x, z)=0 \\ z(1-z)=0 \end{cases}$, 假定方程组存在解 (x_1, y_1, z_1) ,

且 $x_1, y_1, z_1 \in [0, 1]$, 则有

$$\begin{cases} w(y_1, z_1)=0, \\ t(x_1, z_1)=0, \\ z_1(1-z_1)=0. \end{cases} \quad (11)$$

将(11)式代入(7)式, 得系统在平衡状态 (x_1, y_1, z_1) 处的雅可比矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & x_1(1-x_1)A_{xy}^{(1)} & x_1(1-x_1)A_{xz}^{(1)} \\ y_1(1-y_1)A_{yx}^{(1)} & 0 & y_1(1-y_1)A_{yz}^{(1)} \\ 0 & 0 & (1-2z_1)g(x_1, y_1) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中, $A_{xy}^{(1)} = \frac{\partial w(y, z)}{\partial y} \Big|_{(x_1, y_1, z_1)}$, $A_{xz}^{(1)} = \frac{\partial w(y, z)}{\partial z} \Big|_{(x_1, y_1, z_1)}$,

$$A_{yx}^{(1)} = \frac{\partial t(y, z)}{\partial x} \Big|_{(x_1, y_1, z_1)}, \quad A_{yz}^{(1)} = \frac{\partial t(y, z)}{\partial z} \Big|_{(x_1, y_1, z_1)}.$$

矩阵 \mathbf{J} 的特征值为 $\lambda_1 = (1-2z_1)g(x_1, y_1)$, $\lambda_{2,3} = \pm \sqrt{x_1(1-x_1)A_{xy}^{(1)}y_1(1-y_1)A_{yx}^{(1)}}$. 由此可知, 系统在平衡状态 (x_1, y_1, z_1) 处不满足渐近稳定.

类似可得, 当 $\begin{cases} w(y, z)=0 \\ y(1-y)=0 \\ g(x, y)=0 \end{cases}$ 或 $\begin{cases} x(1-x)=0 \\ t(x, z)=0 \\ g(x, y)=0 \end{cases}$ 时, 系统

在平衡点处不满足渐近稳定.

(4) 若 $\begin{cases} w(y, z)=0 \\ t(x, z)=0 \\ g(x, y)=0 \end{cases}$, 假定方程组存在解 (x_2, y_2, z_2) ,

且 $x_2, y_2, z_2 \in [0, 1]$, 则有

$$\begin{cases} w(y_2, z_2)=0, \\ t(x_2, z_2)=0, \\ g(x_2, y_2)=0. \end{cases} \quad (13)$$

将(13)式代入(7)式, 得系统在平衡状态 (x_2, y_2, z_2) 处的雅可比矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & x_2(1-x_2)A_{xy}^{(2)} & x_2(1-x_2)A_{xz}^{(2)} \\ y_2(1-y_2)A_{yx}^{(2)} & 0 & y_2(1-y_2)A_{yz}^{(2)} \\ z_2(1-z_2)A_{zx}^{(2)} & z_2(1-z_2)A_{zy}^{(2)} & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\text{式中, } A_{xy}^{(2)} = \frac{\partial w(y, z)}{\partial y} \Big|_{(x_2, y_2, z_2)}, \quad A_{xz}^{(2)} = \frac{\partial w(y, z)}{\partial z} \Big|_{(x_2, y_2, z_2)},$$

$$A_{yx}^{(2)} = \frac{\partial t(x, z)}{\partial x} \Big|_{(x_2, y_2, z_2)}, \quad A_{yz}^{(2)} = \frac{\partial t(x, z)}{\partial z} \Big|_{(x_2, y_2, z_2)},$$

$$A_{zx}^{(2)} = \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \Big|_{(x_2, y_2, z_2)}, \quad A_{zy}^{(2)} = \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \Big|_{(x_2, y_2, z_2)}.$$

(14)式表明矩阵 \mathbf{J} 的主对角线元素全为 0, 由此可得 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0$, 进一步可得 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 中至少有一个特征值的实部不小于 0. 因此系统在平衡状态 (x_2, y_2, z_2) 不满足渐近稳定.

综上讨论可得: 对于风火网三方的复制动态系统只可能存在 $E_1(0, 0, 0), E_2(0, 0, 1), E_3(0, 1, 0), E_4(0, 1, 1), E_5(1, 0, 0), E_6(1, 0, 1), E_7(1, 1, 0), E_8(1, 1, 1)$ 8 个状态, 使得系统满足渐近稳定.

由定理 1 知多群体非对称进化博弈的稳定策略即为复制动态系统的渐近稳定状态. 因此, 风火网三方进化博弈行为中只存在 $E_1 \sim E_8$ 这 8 种可能的进化稳定策略, 且均为纯策略纳什均衡.

4 风火网三方进化稳定影响因素分析

根据以上分析可知, 风火网三方进化博弈存在

多个可能的渐近稳定状态, 其最终状态的确定取决于博弈的收益矩阵. 在此进化博弈中, 政府可以通过出台新能源相关并网政策, 促使收益矩阵发生变化, 改变进化结果. 下面讨论政府出台新能源政策与否对进化结果的影响.

4.1 政府不出台新能源政策

在风电并网时, 如果政府对风火网三方不进行政策干预, 则各方收益应满足如下关系.

(1) 电网企业采取积极消纳风电的策略.

如果火电企业采取与风电企业协作的策略, 主动为风电削峰填谷, 此时风电企业采取不协作策略较之协作策略所得收益会更大, 同时使得火电企业利益受损, 即有 $w_3 > w_1, t_3 < t_1$.

如果火电企业采取与风电企业不协作的策略, 同样地, 风电企业采取不协作策略较之协作策略所得收益更大, 同时使得火电企业利益受损, 即有 $w_4 > w_2, t_4 < t_2$.

类似可知, 如果风电企业采取与火电企业协作的策略, 那么, 火电企业采取不协作策略较之协作策略所得收益更大, 同时使得风电企业利益受损, 即有 $w_2 < w_1, t_2 > t_1$. 同样地, 如果风电企业采取与火电企业不协作的策略, 火电企业采取不协作策略较之协作策略所得收益更大, 同时使得风电企业利益受损, 即有 $w_4 < w_3, t_4 > t_3$.

由以上分析可得: $w_3 > w_4 > w_2$ 且 $w_3 > w_1 > w_2, t_2 > t_4 > t_3$ 且 $t_2 > t_1 > t_3$.

(2) 电网企业采取消极消纳风电的策略.

类似情形(1)讨论, 在电网企业消极消纳风电的策略下, 有 $w_7 > w_8 > w_6$ 且 $w_7 > w_5 > w_6, t_6 > t_8 > t_7$ 且 $t_6 > t_5 > t_7$.

另外, 由于新能源接入电网将增加电网企业维护电力系统安全稳定运行, 保证电能质量等方面的辅助成本, 因此在同等条件下电网企业消极消纳风电的收益要高于积极消纳风电的收益, 即有 $g_1 < g_5, g_2 < g_6, g_3 < g_7, g_4 < g_8$.

结合表 1 及以上分析可知, 在政府不出台新能源政策情形下, 风火网三方进化博弈的稳定状态为风电企业和火电企业均采取互不协作策略, 电网企业采取消极消纳风电的策略.

4.2 政府出台新能源政策

在风电并网时, 如果政府对风火网三方进行政

策干预, 改变博弈收益矩阵中的相关参数, 可使进化博弈最终稳定在期望状态.

由表 1 知, 风火网三方进化博弈的结果可能是 $E_1 \sim E_8$ 平衡状态对应的 8 种进化稳定策略, 各个平衡状态之间的容斥关系如表 2 所示.

由表 2 可以看出, 在风火网三方组成的复制动态系统中可能同时存在多个渐近稳定状态, 系统最终收敛于何处取决于博弈发生的初始状态^[17]. 为了促进新能源的开发利用, 提高其接入电网的确定性, 使博弈最终稳定在策略组合 $\{W_1, T_1, G_1\}$, 即风电与火电协作送出, 电网企业积极消纳风电, 那么复制动态系统只能有一个渐近稳定状态 E_8 .

假设当政府出台新能源政策对风电并网进行干预时, 风火网三方的博弈收益由 w_i, t_i, g_i 变为 w'_i, t'_i, g'_i ($i=1, 2, \dots, 8$). 如果 w'_i, t'_i, g'_i 满足以下条件:

- (1) $w'_3 < w'_1, t'_2 < t'_1, g'_5 < g'_1$ 都成立;
- (2) $w'_6 > w'_8, t'_7 > t'_8, g'_4 > g'_8$ 至少有一个成立;
- (3) $w'_2 > w'_4, t'_3 > t'_4, g'_8 > g'_4$ 至少有一个成立;
- (4) $w'_5 > w'_7, t'_8 > t'_7, g'_3 > g'_7$ 至少有一个成立;
- (5) $w'_8 > w'_6, t'_5 > t'_6, g'_2 > g'_6$ 至少有一个成立.

那么, 复制动态系统只在状态 E_8 处渐近稳定,

表 2 平衡状态的容斥关系

平衡状态	可能相容状态	相斥状态
E_1	E_4, E_6, E_7, E_8	E_2, E_3, E_5
E_2	E_3, E_5, E_7, E_8	E_1, E_4, E_6
E_3	E_2, E_5, E_6, E_8	E_1, E_4, E_7
E_4	E_1, E_5, E_6, E_7	E_2, E_3, E_8
E_5	E_2, E_3, E_4, E_8	E_1, E_6, E_7
E_6	E_1, E_3, E_4, E_7	E_2, E_5, E_8
E_7	E_1, E_2, E_4, E_6	E_3, E_5, E_8
E_8	E_1, E_2, E_3, E_5	E_4, E_6, E_7

参考文献

- 1 Wang F, Yin H T, Li S D. China's renewable energy policy: Commitments and challenges. *Energy Policy*, 2010, 38: 1872–1878
- 2 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题. *电力系统自动化*, 2003, 27: 84–89
- 3 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施. *中国电机工程学报*, 2010, 30: 1–9
- 4 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
- 5 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
- 6 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
- 7 王先甲, 全吉, 刘伟兵. 有限理性下的演化博弈与合作机制研究. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(增刊): 82–93
- 8 Smith J M, Price G R. The logic of animal conflict. *Nature*, 1973, 246: 15–18
- 9 高洁, 盛昭瀚. 演化博弈论及其在电力市场中的应用. *电力系统自动化*, 2003, 27: 18–21
- 10 王晓天, 薛惠锋, 张强. 可再生能源发电并网利益协调演化博弈分析. *系统工程*, 2012, 30: 94–99

风火网三方进化博弈的稳定策略为 $\{W_1, T_1, G_1\}$.

由于条件(2)~(5)均只要求其中有一个不等式满足即可, 因此政府可以在满足上述 5 个条件的前提下, 制定成本较低的新能源政策来促进风电的开发利用.

5 结语

进化博弈论摈弃了传统博弈理论完全理性人的假设, 强调博弈达到均衡的动态调整过程, 使得现实与理论更为相符. 许多学者研究了两个参与主体的进化博弈问题, 对于三方参与的案例没有深入研究. 本文以新能源接入下风电企业、火电企业及电网企业的利益博弈为例, 建立了三群体 $2 \times 2 \times 2$ 非对称进化博弈的复制动态系统, 完整地讨论了系统各个可能的平衡点, 求解了平衡点满足渐近稳定的条件. 并通过对风火网收益参数的分析得到如下结论:

在新能源接入的风火网三方进化博弈中, 如果政府对参与风电并网的各方不进行政策引导, 风电产业由于其自身市场竞争力不足得不到健康发展;

政府可以出台新能源并网相关政策, 改变风火网三方的收益, 引导新能源良性发展, 但政策需要满足文中所给条件.

上述结论可解释新能源并网困难问题, 并为政府制定新能源并网政策提供决策依据, 对保证新能源合理发展具有理论意义和实用价值. 需要说明的是, 本文考虑到进化博弈模型的现实应用, 对复制动态系统平衡状态渐近稳定性的讨论并不十分严格, 但对于具体的案例, 其结果依然可以满足要求. 另外, 风火网三方实际收益的获取十分复杂, 本文对此作了简化, 涉及三者实际收益的具体案例有待进一步研究.

- 11 蔡玲如, 王红卫, 曾伟. 基于系统动力学的环境污染演化博弈问题研究. 计算机科学, 2009, 36: 234–238
- 12 达庆利, 张骥骥. 有限理性条件下进化博弈均衡的稳定性分析. 系统工程理论方法应用, 2006, 15: 279–284
- 13 魏芳芳, 陈福集. 三方非对称进化博弈行为分析. 浙江大学学报: 理学版, 2013, 40: 146–151
- 14 于维生. 博弈论与经济. 北京: 高等教育出版社, 2007
- 15 Selten R. Evolutionary stability in extensive two-person games. *Math Soc Sci*, 1983, 5: 269–363
- 16 刘豹, 唐万生. 现代控制理论. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 17 谢识予. 经济博弈论. 第 3 版. 上海: 复旦大学出版社, 2001

Analysis of tripartite asymmetric evolutionary game among wind power enterprises, thermal power enterprises and power grid enterprises under new energy resources integrated

LIU LianGuang, LIU HongXi, LIU ZiFa & CHEN WeiHua

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

In electricity market, wind power enterprises, thermal power enterprises and power grid enterprises belong to different stakeholders, thus an interest conflict exists within the utilization of new energy resources. To study the tripartite interest relationship not only relates to the settlement of the conflict among the participants of wind power integration, further, it will provide supports to policy makers to formulate the market structure of electricity and rules of competition. Based on the players with bounded rationality, the game situation of wind power enterprises, thermal power enterprises and power grid enterprises is analyzed by use of evolutionary game theory, and the replicator dynamic system of $2 \times 2 \times 2$ asymmetric evolutionary game in three groups is built to simulate the tripartite behaviors according to the payoff matrix. The asymptotic stabilities of all the equilibria are given. Furthermore, the evolutionary result of the three parties without government intervention in new energy resources is given, and the condition to achieve the expected state is provided for the government who can carry out policies to change the three parties' profit. The conclusions of the study may offer some reference for the formulation of electricity market structure and competition rules.

wind power, evolutionary game, evolutionary stable strategy, replicator dynamics, asymptotic stability

doi: 10.1360/N092015-00244