

# 不確実性下における分散型電源の投資意思決定 ～戦略的プロシューマーの市場競争～

桑原 大樹<sup>a</sup>, 伊藤 真理<sup>a</sup>, 高嶋 隆太<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 東京理科大学理工学部経営工学科

## 1 はじめに

近年、太陽光、風力発電等の再生可能エネルギーの普及により、分散型電源を保有するプロシューマーが増加している。プロシューマーとは、自ら発電し消費する消費者である一方、余剰分を市場で売電する供給者でもあるプレーヤーのことである。分散型電源を所有することで、電力市場から調達していた電力（の一部）を賄うことが可能となる。この分散型電源を所有するプロシューマーの増大は、集中型電源の利用の減少による送電コストの増大、電力市場価格の上昇等、様々な問題が顕在化している。これまでの研究では、これらプロシューマーの市場参入における投資意思決定の影響を静的なモデルにより分析が行われてきた[1,2]。また、プロシューマーの投資意思決定に注目しリアルオプション分析を行っている研究は存在するが[3]、投資プロジェクト単体の分析であり、プロシューマーに関して市場との関係性や競争について分析している先行研究は、ほとんど見受けられない。そこで本研究では、リアルオプションモデルを用いて、不確実性下におけるプロシューマーの分散型電源の投資意思決定が電力市場や既存事業者にどのような影響を及ぼすかについて分析し、考察することを目的とする。

## 2 モデル

### 2.1 基本モデル

本研究では、プロシューマーは電力の余剰分を市場以外の場所に売電するものとする。プロシューマーは、 $k$ （一定）を発電する。この発電電力量と需要量との差分で、優先される自己消費量が決定される。全需給量を $Q$ （一定）、全消費量に対するプロシューマーの消費割合を $\alpha$ とすると、プロシューマーの消費量は $\alpha Q$ と表せる。また、本研究では、I) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己生産量 $k$ を超える、II) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超えないといった、二つの場合に分けて分析を行う。

#### I) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超える場合

プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超える場合、優先して自己消費を行い、不足分 $\alpha Q - k$ を市場から購入を行う。すなわち、プロシューマーが市場から購入する電力量は、 $\alpha Q - k$ と表せる。既存電力事業者は、市場清算条件により、市場に供給される電力量が $Q - k$ となるように発電するため、既存電力事業者の発電量は $Q - k$ と表せる。従来の消費者は、電力量 $(1 - \alpha)Q$ を市場から購入していることと市場清算条件が満たされる。

#### II) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超えない場合

プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超えない場合、優先して自己消費を行い、余剰分 $k -$

$\alpha Q$ を市場以外の場所へ売電を行う。すなわち、プロシューマーが市場以外の場所へ売電する電力量は  $k - \alpha Q$  と表せる。既存電力事業者は、市場清算条件により、市場に供給される電力量が  $(1 - \alpha)Q$  となるように発電するため、既存電力事業者の発電量は  $(1 - \alpha)Q$  と表せる。従来の消費者は、電力量  $(1 - \alpha)Q$  を市場から購入しているとする事で市場清算条件が満たされる。

## 電力市場価格

### I) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超える場合

市場での電力取引量は、 $Q - k$  であり、電力市場価格  $P_t$  は逆需要関数  $P_t = X_t \{1 - \eta(Q - k)\}$  で与えられる。 $\eta$  は逆需要関数の傾きを表す。 $X_t$  は外生的な需要ショックを表し、幾何ブラウン運動に従うと仮定する。

### II) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超えない場合

市場での電力取引量は、 $(1 - \alpha)Q$  であり、電力市場価格  $P_t$  は逆需要関数  $P_t = X_t \{1 - \eta(1 - \alpha)Q\}$  で与えられる。 $\eta$  は逆需要関数の傾きを表す。 $X_t$  は外生的な需要ショックを表し、幾何ブラウン運動に従うと仮定する。

## プロシューマーの収益フロー

プロシューマーの収益フローは、電力消費による便益、発電コスト、市場への売電収益、市場からの購入コストで決定される。

### I) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超える場合

発電電力量では、自己消費量を賄うことができない場合、不足分  $\alpha Q - k$  を市場から購入する。この場合は市場以外の場所への売電は行わない。すなわち、この場合のプロシューマーの収益フローは、次式で表される。

$$\begin{aligned}\pi_t &= \bar{P}\alpha Q - ck - (P_t + \tau)(\alpha Q - k) \\ &= \{1 - \eta(Q - k)\}(k - \alpha Q)X_t + \bar{P}\alpha Q - ck + \tau(k - \alpha Q)\end{aligned}$$

ここで、右辺第1項目は自己消費による限界便益  $\bar{P}$  に自己消費量を掛けたもので電力消費による便益を表している。第2項目は発電によるコストを表し、 $c$  は限界発電コストを表す。第3項目は市場からの購入コストを表す。

### II) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超えない場合

発電電力量で自己消費量を賄うことができる場合、余剰分  $k - \alpha Q$  を市場以外の場所へ売電する。この場合には市場からの電力購入は行わない。すなわち、この場合のプロシューマーの収益フローは次式で表される。

$$\begin{aligned}\pi_t &= \bar{P}\alpha Q - ck + P_t(k - \alpha Q) \\ &= \{1 - \eta(1 - \alpha)Q\}(k - \alpha Q)X_t + \bar{P}\alpha Q - ck\end{aligned}$$

第3項目は市場以外の場所への売電収益を表す。

## 投資閾値の算出

### I) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超える場合

この場合、 $\{1 - \eta(Q - k)\}(k - \alpha Q) < 0$  であることから、投資オプションを算出する際の、Bellman 方程式によって得られる特性方程式の解である 0 より小さい負の根である  $\beta_2$  を用いる。投資後のプロシューマーの価値は初期費用を  $I$  として以下のように表せる。

$$V(x) - I = \frac{\{1 - \eta(Q - k)\}(k - \alpha Q)x}{\rho - \mu} + \frac{\bar{P}\alpha Q - ck + \tau(k - \alpha Q)}{\rho} - I$$

投資閾値は、value-matching 条件と smooth-pasting 条件を用いることで導出することができる。

$$\begin{cases} V(x^*) - I = A_2(x^*)^{\beta_2} \\ (V(x^*) - I)' = \beta_2 A_2(x^*)^{\beta_2-1} \end{cases}$$

$A_2$ はオプション価値の係数を表す。

上式の、第一式が value-matching 条件、第二式が smooth-pasting 条件である。これらの条件により、投資閾値は次式で表される。

$$x^* = \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1} \frac{\rho - \mu}{\{1 - \eta(Q - k)\}(k - \alpha Q)} \left( -\frac{\bar{P}\alpha Q - ck + \tau(k - \alpha Q)}{\rho} + I \right)$$

## II) プロシューマーの自己消費量 $\alpha Q$ が自己発電量 $k$ を超えない場合

この場合、 $\{1 - \eta(1 - \alpha)Q\}(k - \alpha Q) > 0$ であることから、投資オプションを算出する際の、Bellman 方程式によって得られる特性方程式の解である 1 より大きい正の根である $\beta_1$ を用いる。

投資後のプロシューマーの価値は、初期費用を $I$ として以下のように表せる。

$$V(x) - I = \frac{\{1 - \eta(1 - \alpha)Q\}(k - \alpha Q)x}{\rho - \mu} + \frac{\bar{P}\alpha Q - ck}{\rho} - I$$

投資閾値は、value-matching 条件と smooth-pasting 条件を用いることで導出することができる。

$$\begin{cases} V(x^*) - I = A_1(x^*)^{\beta_1} \\ (V(x^*) - I)' = \beta_1 A_1(x^*)^{\beta_1-1} \end{cases}$$

$A_1$ はオプション価値の係数を表す。

上式の、第一式が value-matching 条件、第二式が smooth-pasting 条件である。これらの条件により、投資閾値は次式で表される。

$$x^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{\rho - \mu}{\{1 - \eta(1 - \alpha)Q\}(k - \alpha Q)} \left( -\frac{\bar{P}\alpha Q - ck}{\rho} + I \right)$$

## 参考文献

- [1] Gautier, A., Jacqmin, J., Poudou, J.-C., 2018. The prosumers and grid. *Journal of Regulatory Economics* 53, 100-126.
- [2] Chen, Y., Tanaka, M., Takashima, R., 2020. Death spiral, transmission charge, and prosumers in the electricity market. 42<sup>nd</sup> IAEE International Conference proceedings.
- [3] Bertolini, M., D'Alpaos, C., Moretto, M., 2018. Do smart grids boost investments in domestic PV plants? Evidence from the Italian electricity market. *Energy* 149, 890-902.