

電力システムの経済理論： 電源投資

金本良嗣

日本卸電力取引所理事長

政策研究大学院大学客員教授，東京大学名誉教授

アウトライン

1. 系統接続ルール
2. 電源キャパシティーの最適解
3. 電源キャパシティーの市場均衡

1. 系統接続ルール

系統接続におけるシャローとディープ

- シャロー接続：新規系統接続時に電源線部分のみを負担し、必要となる系統増強の費用は負担しない。イギリス、ドイツ、CAISO、ERCOT等が採用
- ディープ接続：新規接続時に必要となる系統増強費用も負担する。PJMが採用。
- 日本：上位2電圧の基幹系統についてはシャロー。ローカル系統や配電系統はディープ。
 - 基幹系統においても一般負担の上限（4.1万円/kW）を超える部分については発電側負担である。
 - 発電側課金が導入された。（2024年4月）
- 日本の先着優先系統接続ルール：空き容量がなくなって増強をトリガーする電源が増強コストを負担。その前に接続した電源は増強コストを負担しない。
 - **ノンファーム型接続の導入にもなって見直された。**

送電系統のプライシングと接続ルール

項目	市場分断	系統混雑時の出力抑制に対する補償	系統接続時の費用負担	系統利用の費用負担
イギリス	均一価格	○	シャロー (TSO) セミシャロー (DSO) ※1	ゾーン制 発電側課金あり
ドイツ	均一価格	○	シャロー	TSO内均一 100%需要側
PJM	LMP	—	ディープ	TO区域内均一 100%需要側
日本	ゾーン制	×	シャロー (基幹系) ※2 ディープ (基幹系以外) ※3	発電側課金 2024年4月導入

※1 接続電圧の1つ上位の電圧階級の系統の増強費用までを発電事業者が負担し、それ以上の電圧階級の増強費用はTSO/DNOが負担する。

※2 原則一般負担だが、系統増強費用が「4.1(万円/kW)×新規電源の容量(kW)」を超える部分については発電事業者が負担

※3 広域機関資料ではセミシャローとしているが、以下のガイドラインの記述はPJMにおけるディープと同様であると考えられる。「特定の発電等設備設置者が受益している場合には、受益の範囲に応じ特定負担とする。」(発電設備の設置に伴う電力系統の増強及び事業者の費用負担等の在り方に関する指針、資源エネルギー庁電力・ガス事業部、令和6年5月15日)

系統増強・系統アクセスの判断基準

• 系統増強必要性判断

- PJMでは**需要ピーク時**にすべてのファーム電源が発電できるだけの系統容量があるかどうかで判断（Deliverability Test, 送電可能性テスト）。
- 需要ピーク時には多くの電源が稼働できる。送電制約によってピーク時でも稼働できない電源が存在するときには、送電容量を増強する。
- オフピーク時に稼働できない電源が存在することは許容。

• 日本の系統アクセス基準

- ピーク時以外も混雑を起こさせない。系統増強によって混雑が解消されるまでは接続させないという考え方を採用していた。
- ノンファーム型接続の導入（2021年）：混雑時には出力制御を行うという条件で混雑系統にもアクセスを可能にした。当初は、ノンファーム型接続で連系した新規電源のみ出力制御を行うノンファーム型接続＋先着優先
- ノンファーム型接続＋再給電方式（2022年）：混雑時は既設電源も含めてメリットオーダーに従って出力制御を行う。

• 日本の系統増強基準

- 発送電一貫体制の下では電源と系統を一体で判断。
- 自由化後は、混雑系統は新規アクセス事業者の負担で系統増強。
- 費用便益評価による判断に移行。

2. 電源キャパシティー に関する最適解

電源キャパシティー最適化問題

- 電源キャパシティー (K_j^i) を最適化.
- 電源キャパシティーに関するKKT条件を導出.

$$\text{Max} \sum_s \sum_i \pi_s \left(U_s(Q_s^i) - \sum_j c_j q_{js}^i \right) - \sum_i \sum_j F_j^i(K_j^i) - C_T(K_T)$$

s.t.

$$(P_s^1) \quad Q_s^1 = q_s^1 + e_s, \text{ for any } s$$

$$(P_s^2) \quad Q_s^2 = q_s^2 - e_s, \text{ for any } s$$

$$(p_s^i) \quad q_s^i = \sum_j q_{js}^i, \text{ for any } i \text{ and } s$$

$$(\gamma_s^+, \gamma_s^-) \quad -K_T \leq e_s \leq K_T, \text{ for any } s$$

$$(\delta_{js}^i) \quad q_{js}^i \leq K_j^i, \quad i = 1, 2, \text{ for any } j \text{ and } s$$

$$(\lambda_{js}^i) \quad 0 \leq q_{js}^i, \quad i = 1, 2, \text{ for any } j \text{ and } s$$

ラグランジアンとKKT条件

ラグランジアン：

$$\begin{aligned} \Omega = & \sum_s \pi_s \sum_i \left(U_s(Q_s^i) - \sum_j c_j q_{js}^i \right) - \sum_i \sum_j F_j^i(K_j^i) - C_T(K_T) \\ & + \sum_s \pi_s \left\{ P_s^1(q_s^1 + e_s - Q_s^1) + P_s^2(q_s^2 - e_s - Q_s^2) \right\} + \sum_s \pi_s \sum_i p_s^i \left(\sum_j q_{js}^i - q_s^i \right) \\ & + \sum_s \pi_s \left\{ \gamma_s^+(K_T - e_s) + \gamma_s^-(e_s + K_T) \right\} + \sum_s \pi_s \sum_i \sum_j \left\{ \delta_{js}^i (K_j^i - q_{js}^i) + \lambda_{js}^i (q_{js}^i - 0) \right\} \end{aligned}$$

KKT条件：

給電の最適条件

$$K_j^i : \sum_s \pi_s \delta_{js}^i = F_j^{i'}(K_j^i)$$

$$\begin{aligned} \delta_{js}^i &= p_s^i - c_j \text{ if } q_{js}^i = K_j^i \\ \delta_{js}^i &= 0 \text{ if } q_{js}^i < K_j^i \end{aligned}$$

$$\sum_{s, p_s^i \geq c_j} \pi_s [p_s^i - c_j] = F_j^{i'}(K_j^i)$$

kWあたり短期利潤（価格-限界費用）＝電源キャパシティー増加の限界費用

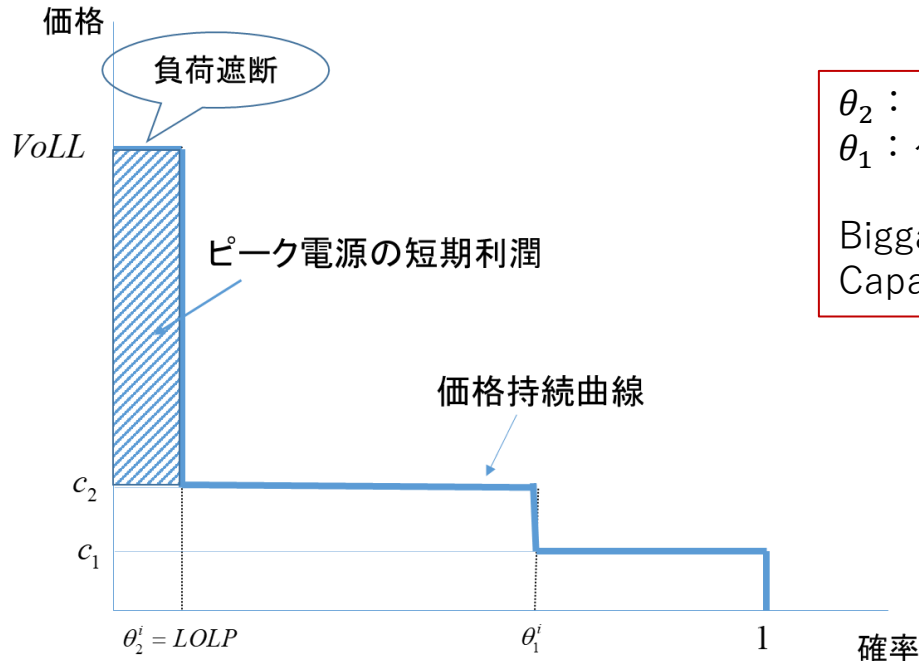
電源キャパシティーの最適条件

- キャパシティー増加による収入増：短期利潤 = $\sum_{s, p_s \geq c_j} \pi_s [p_s - c_j]$
- キャパシティー増加による費用増：キャパシティー増加の限界費用 = $F_j'(K_j)$
- 最適電源キャパシティー：短期利潤 = キャパシティー増加の限界費用
 - ピーク電源：負荷遮断時の短期利潤 = 限界キャパシティー費用

$$(VoLL - c_2)\theta_2 = F_2'(K_2)$$
 - ベース電源：ピーク電源稼働時の収益が追加される。

$$(VoLL - c_1)\theta_2 + (c_2 - c_1)(\theta_1 - \theta_2) = F_1'(K_1)$$

ピーク電源は負荷遮断時のみ利潤を得る



θ_2 : ピーク電源がフル稼働する確率 = 負荷遮断確率
 θ_1 : ベース電源がフル稼働する確率

Biggar and Hesamzadeh (2014)はフル稼働確率を Capacity Factor と呼んでいる。

電源キャパシティーの最適条件とLOLP

- 給電の最適条件が成り立っている場合の最適電源キャパシティー：短期利潤＝キャパシティー増加の限界費用
- ピーク電源の最適キャパシティー：

$$(VoLL - c_2)\theta_2 = F_2'(K_2)$$
 - θ_2 = ピーク電源のフル稼働確率 = 停電（負荷遮断）確率
- 最適な停電確率（LOLP）：

$$\theta_2^{i*} = LOLP^{i*}$$

$$= \frac{\text{限界キャパシティー費用}^i}{VoLL - \text{限界電源タイプの限界費用}}$$

- ピーク電源（石油火力）のコスト構造：
 - 限界費用：燃料費12.9円/kWh
 - 限界キャパシティー費用：2.46円/kW
 = (運転維持費3.3円/kWh + 資本費4.9円/kWh) × 0.3kWh/kW（設備利用率30%）
- 停電コスト：3,000円/kWh



- LOLP = 約0.082%
 - 年間停電時間：7.14時間
 - 伝統的基準は年0.3日 = 7.2時間)
 - 英国：停電コスト17ポンド/kWhに対応する信頼性基準は年間3時間の停電。（17ポンド = 2210円）

電源キャパシティー最適条件の政策的含意

- ピーク電源の限界キャパシティー費用は負荷遮断時に価格がVoLLに等しくなることによる収益でカバーされる。
- 送電容量が最適でない場合も電源キャパシティーの最適条件は同じ。
 - 送電容量が過小で増強が必要なときでも、短期利潤がキャパシティー増加の限界費用より大きい電源は増強前に接続させた方がよい。
 - コネクト&マネージの理論的な基礎を提供。
- 短期利潤が限界キャパシティー費用に等しいときに電源キャパシティーが最適になるという結果は、給電の最適条件が成り立っているという仮定に依存。
 - 例) 地球温暖化外部費用によって歪みが発生している場合には、この結果は修正が必要。

3. 電源キャパシティ の市場均衡

市場均衡における電源キャパシティー

- 競争市場においては限界電源の利潤がゼロになるまでキャパシティーが増加：

$$\partial \Pi_j^i / \partial K_j^i = \sum_{s, p_s^i \geq c_j} \pi_s (p_s^i - c_j) - F_j^{i'}(K_j^i) = 0$$

- 市場価格が最適解におけるシャドープライスと等しくなっていれば，競争均衡で電源キャパシティーの最適条件が満たされる。
- ① 送電混雑時に地域間値差を発生させる，② 停電時の価格をVoLLに等しくするという2つの政策介入がなされていれば，電源キャパシティーが最適になる。
- 送電容量が最適でない場合もこの条件が成立する。したがって，送電容量が過小なときでも，新規アクセスの制限は望ましくない。
- 欧州型の「均一価格制＋再給電」：電源キャパシティーは最適でない。電力融通の受け側の地域では電源キャパシティーが過小。送り側の地域では過大。