電力市場における需要応答を考慮した凸包価格設定

伊藤 直紀[1,3], 武田 朗子[2,3], 滑川 徹[1,3]

[1] 慶應義塾大学, [2] 東京大学, [3]JST-CREST

2013 年 6 月 29 日

動的価格設定

動的価格設定 (Dynamic Pricing)

1 時間ごとに異なる電力価格を設定する
モチベーション：需要のピークシフトを促す

$\boxed{\text{前提：電力価格の設定によって、需要量を変えることができる}}$
※この電力価格の設定によって引き起こされる、需要家の電力消費パターンの変化　…　需要応答 *(Demand Response)*

社会実証も進んでいる *HOT* なトピック

- 米国*:*カリフォルニア州を筆頭に *10*ヶ所くらいの州
- 日本*:*北九州、横浜、豊田、けいはんな *('12* 夏 社会実験*)*

本研究の位置づけ

前提：電力価格の設定によって、需要量を変えることができる

- 従来の動的価格設定モデルは、発電機の起動コストを考慮していない
- 小規模な供給家・発電機では、起動コストの占める割合が大きくなる
  $\rightarrow$ 起動コストを考慮した価格決定が必要

本研究の位置づけ

価格による需要の変化の考慮 (動的価格設定) + 起動コストを考慮
→ 合理的な価格設定法の提案

Table : 主な既存の価格設定法と提案モデルの関係

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="2">起動コストを考慮しているか</td></tr>
<tr><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td rowspan="2">需要が価格に応じて変化するか</td><td>○</td><td>提案モデル</td><td>動的価格設定
(Dynamic Pricing)</td></tr>
<tr><td>×</td><td>凸包価格設定
(Convex Hull Pricing)</td><td>限界費用価格設定
(Marginal Cost Pricing)</td></tr>
</table>

目次

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="2">起動コストを考慮しているか</td></tr>
<tr><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td rowspan="2">需要が
に応じて
変化するか</td><td>○</td><td>提案モデル</td><td>動的価格設定
(Dynamic Pricing)</td></tr>
<tr><td>×</td><td>凸包価格設定
(Convex Hull Pricing)</td><td>限界費用価格設定
(Marginal Cost Pricing)</td></tr>
</table>

市場モデル

市場の参加者
1.需要家，2.供給家，3.独立系統運用機関（Independent System Operator：ISO）

ISO
- 電力市場を管理する非営利機関
- 価格設定を行う

$\downarrow p$

代表需要家

需要量dを設定する
(電力価格に依らない)

代表供給家

・与えられた需要dを供給する

起動停止問題 (Unit commitment problem: UCP)

始動コストを持つ発電機が複数個ある状況を考える
ある所与の需要 d → 発電機を上手く組み合わせて安く発電したい

起動停止問題 (Unit commitment problem: UCP) [既存]

y : 総発電量を表すパラメーター ($y = d$ として解く。)

$$(P_U) \quad v(y) := \left| \begin{array}{ll} \displaystyle\min_{\boldsymbol{g},\boldsymbol{z}} & \sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j \\ \text{s.t.} & \sum_j g_j = y \\ & z_j m_j \le g_j \le z_j M_j, \quad z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j. \end{array} \right.$$

j	:	発電機を表す添字
g_j	:	発電量
C_j	:	区分線形費用関数
S_j	:	起動コスト
m_j, M_j	:	発電量の上下限
z_j	:	停止・起動を表す 0-1 変数

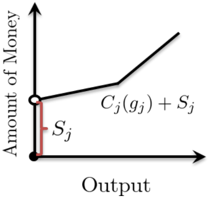
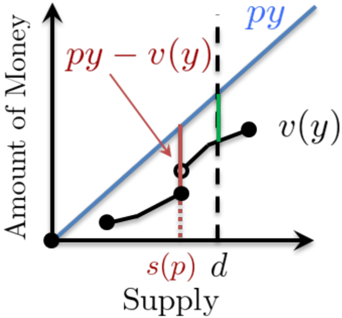


Figure : 発電機 j の費用関数

非凸費用関数



特徴

$v(y)$: 下半連続

問題

- 需要 d は所与 (固定)
- 供給家は需要 d を満たさなければいけない

ISO はどのような価格設定をすればいいか？

Uplift payment [既存]

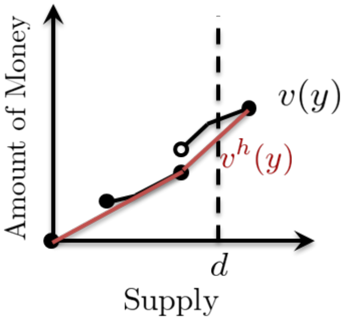
供給家が持つ "不満" の指標

$$\Pi(p;d) := \sup_y\{py - v(y)\} - \{pd - v(d)\}$$

→ Uplift payment をなるべく小さくする価格 p を考える。

※凸費用関数ならば Uplift payment を 0 にできる

凸包価格設定



費用関数 v の凸包 v^h

$$v^h(y) := \inf\{\mu \mid (y,\mu) \in \mathsf{conv}(\mathsf{epi}(v))\}$$

$\rightarrow v^h(y) \leq v(y), \forall y$ を満たす最大の凸関数 v^h

v^h は、関数 v の双共役 (biconjugate) 関数と一致することが知られている。

アイディア

凸包 v^h の d における劣勾配を価格 p^h として採用する。

凸包価格 p^h(Convex hull price) [Gribik et al. 2007]

$$p^h \in \partial v^h(d).$$

$v^h(y)$ を陽に得るのは難しい。

凸包価格決定

(P_{U}) の部分双対問題

$$(D_{\mathsf{U}}) \quad \max_{\lambda} \left| \begin{array}{ll} \min\limits_{\boldsymbol{g},\boldsymbol{z}} & \sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j + \lambda(d - \sum_j g_j) \\ \text{s.t.} & m_j z_j \le g_j \le M_j z_j, \quad z_j \in \{0,1\}, \ \forall j. \end{array} \right.$$

(D_{U}) の最適解を λ^* とおく。

λ^* が満たす性質 [Gribik et al. 2007]

- λ^* は凸包価格になっている, i.e.,

$$\lambda^* \in \partial v^h(d)$$

- λ^* は動機付け価格 (Uplift payment) を最小化する, i.e.,

$$\lambda^* \in \arg\min_p \Pi(p; d)$$

目次

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="2">起動コストを考慮しているか</td></tr>
<tr><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td rowspan="2">需要が
に応じて
変化するか</td><td>○</td><td>提案モデル</td><td>動的価格設定
(Dynamic Pricing)</td></tr>
<tr><td>×</td><td>凸包価格設定
(Convex Hull Pricing)</td><td>限界費用価格設定
(Marginal Cost Pricing)</td></tr>
</table>

市場モデル

市場の参加者

1.需要家，2.供給家，3.独立系統運用機関（Independent System Operator：ISO）

ISO

- 電力市場を管理する非営利機関
- 需給の均衡を保つように価格設定を行う

p p

代表需要家

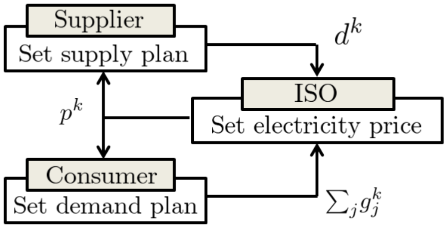
・自らの利益を最大化するように需要量を決定

代表供給家

・自らの利益を最大化するように供給量を決定

需要量・供給量は価格に応じて変動する！

価格決定スキーム



1. ISO が価格 p^k を決定する
2. 需要家は需要計画量 d^k
   供給家は供給計画量 $\sum_j g_j^k$ を決める
3. 需給が一致していなかったら
   ISO は価格 p^{k+1} を設定しなおす
4. $k \leftarrow k + 1$. N 回繰り返す

モデルの仮定

下線部以外は先行研究 (Roozbehani et al. 2012) (Miyano & Namerikawa 2012) でも仮定されている。

仮定 1(関数の仮定)

需要家の効用関数 u : $\mathcal{C}^2$-級, 単調増加, 狭義凹関数.　金銭的な尺度
供給家の費用関数 v : 起動停止問題 (UCP) から導出される。下半連続。

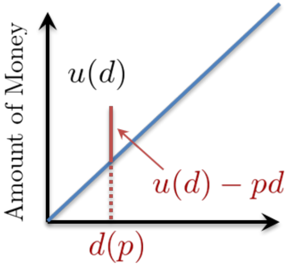
仮定 2(情報の仮定)

ISO にとって、効用関数 u は未知である.
ISO にとって、費用関数 v が既知である必要は無い.

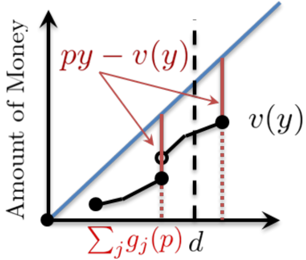
仮定 3(単純化の仮定)

1. 送電ロスは無視できる.
2. 送電線の送電容量は十分大きい.
3. 予備電力は持たなくて良い.

需要家と供給家の問題



Demand



Supply

需要家の問題

$$d(p) = \arg\max_{d \geq 0} u(d) - pd$$

供給家の問題

$$(\boldsymbol{g}(\lambda), \boldsymbol{z}(\lambda)) \in$$

$$\underbrace{\arg\max_{(\boldsymbol{g},\boldsymbol{z}) \in X} p \textstyle\sum_j g_j - \left\{ \sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j \right\}}_{\arg\max_y \; py - v(y)}$$

(Miyano & Namerikawa 2012)⋯v:凸

$$X := \{(\boldsymbol{g}, \boldsymbol{z}) \mid z_j m_j \leq g_j \leq z_j M_j, \; z_j \in \{0, 1\}, \; \forall j\}$$

ISO の社会効用最大化問題

社会効用：$\{u(d) - pd\} + \{p(\sum_j g_j) - \{\sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j\}\}$ の最大化
送電ロスが無いため、需給制約は $d = (\sum_j g_j)$ のとき満たされる

$$
(P) \left| \begin{array}{ll} \max\limits_{\boldsymbol{g},\boldsymbol{z},d} & u(d) - \left\{\sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j\right\} \\ \text{s.t.} & \sum_j g_j = d, \quad d \geq 0 \\ & z_j m_j \leq g_j \leq z_j M_j, \quad z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j, \end{array} \right.
$$

ISO は効用関数 $u(d)$ を知らないため、(P) を解けない
→ 以下の部分双対問題を考える。

$$
\begin{aligned}
(D)\ \min_{\lambda} \max_{\substack{d \geq 0 \\ (\boldsymbol{g},\boldsymbol{z}) \in X}} & \left\{u(d) - \left\{\sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j\right\} + \lambda(\sum_j g_j - d)\right\} \\
= \min_{\lambda} & \left[\max_{d \geq 0}\{u(d) - \lambda d\} + \max_{(\boldsymbol{g},\boldsymbol{z}) \in X} \left\{\lambda \sum_j g_j - \left\{\sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j\right\}\right\}\right].
\end{aligned}
$$

ただし、$X := \{(\boldsymbol{g}, \boldsymbol{z}) \mid z_j m_j \leq g_j \leq z_j M_j,\ z_j \in \{0,1\},\ \forall j\}$.

$$(D)\ \min_{\lambda}\left[\max_{d\geq 0}\{u(d)-\lambda d\}+\max_{(\boldsymbol{g},\boldsymbol{z})\in X}\left\{\lambda\textstyle\sum_j g_j-\left\{\sum_j C_j(g_j)+\sum_j S_j z_j\right\}\right\}\right].$$

ただし、$X := \{(\boldsymbol{g},\boldsymbol{z}) \mid z_j m_j \leq g_j \leq z_j M_j,\ z_j \in \{0,1\},\ \forall j\}$.

定理 (本研究で示した)

1. 上の双対問題 (D) は最適解 $(\lambda^*, \boldsymbol{g}^*, \boldsymbol{z}^*, d^*)$ を持つ.
2. λ^* は凸包価格になっている, i.e.,

$$\lambda^* \in \partial v^h(d^*).$$

つまり λ^* を価格として採用することで、Uplift payment を最小化できる。

$$(D)\ \min_{\lambda} \underbrace{\left[\max_{d\geq 0}\{u(d)-\lambda d\} + \max_{(\boldsymbol{g},\boldsymbol{z})\in X}\left\{\lambda \sum_j g_j - \left\{\sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j\right\}\right\}\right]}_{\equiv \varphi(\lambda)}.$$

ただし、$X := \{(\boldsymbol{g},\boldsymbol{z}) \mid z_j m_j \leq g_j \leq z_j M_j,\ z_j \in \{0,1\},\ \forall j\}$.

双対関数 $\varphi(\lambda)$ は下半連続な凸関数であることが知られている。

双対関数 $\varphi(\lambda)$ の劣勾配は

$$\partial\varphi(\lambda) \ni \underbrace{\sum_j g_j(\lambda)}_{\substack{(D)\text{ の第 2 項の解}\\ \lambda\text{を価格とした時の供給量}}} - \underbrace{d(\lambda)}_{\substack{(D)\text{ の第 1 項の解}\\ \lambda\text{を価格としたときの需要量}}}$$

で得られることも知られている。

$\longrightarrow$ 劣勾配法で解く

劣勾配法による価格設定アルゴリズム

最急降下法による価格設定アルゴリズム (Miyano & Namerikawa 2012) を、非凸費用関数を扱えるように変更

Algorithm

ステップサイズ $\gamma^k > 0 \ (k = 1, 2, ..., N)$ を決める.

1. *ISO* が初期価格 λ^0 を決定. $k \leftarrow 1$.
2. 需要家、供給家は、以下の問題を解いて需要量 d^k、供給量 $\sum_j g_j^k$ を決定

$$d^k = \arg\max_{d \geq 0} u(d) - \lambda^k d,$$

$$(\boldsymbol{g}^k, \boldsymbol{z}^k) \in \arg\max_{(\boldsymbol{g}, \boldsymbol{z}) \in X} \lambda^k \textstyle\sum_j g_j - \{\sum_j C_j(g_j) + \sum_j S_j z_j\},$$

3. *ISO* は価格を更新する。

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \gamma^k (d^k - \textstyle\sum_j g_j^k).$$

4. ステップ *2,3* を N 回繰り返す。
5. *ISO* は価格を λ^N に固定する。需要量と供給量は d^N となる。

目次

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="2">起動コストを考慮しているか</td></tr>
<tr><td>○</td><td>×</td></tr>
<tr><td rowspan="2">需要が
に応じて
変化するか</td><td>○</td><td>提案モデル</td><td>動的価格設定
(Dynamic Pricing)</td></tr>
<tr><td>×</td><td>凸包価格設定
(Convex Hull Pricing)</td><td>限界費用価格設定
(Marginal Cost Pricing)</td></tr>
</table>

Table : Example of three generators in (Gribik et al. 2007)

		発電機		
	発電容量 (MW)	A	B	C
起動コスト ($)		0	6000	8000
変動コスト 1($/MW)	100	65	40	25
変動コスト 2($/MW)	100	110	90	35

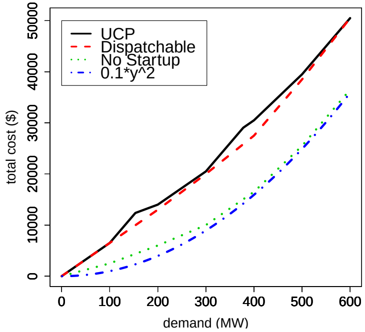


Figure : Cost functions.

※起動停止問題 (UCP) を解く

UCP	:	UCP の解 (実際の費用関数)
Dispatchable	:	UCP の連続緩和 (NY ISO で用いられている)
No Startup	:	始動コスト $S_j = 0$
$0.1y^2$	:	No Startup の 2 次近似

(Miyano & Namerikawa 2012) に従って、以下の需要関数を用いた。

$$D_t(\lambda) = \underbrace{\mu_1 d_{1,t}}_{\text{必要最低限の固定需要}} + \underbrace{\mu_2(1+\delta_{2,t})d_2(\lambda)}_{\text{需要の価格弾力性を考慮}}, \quad (t = 1, 2, \ldots, 24)$$

$d_{1,t}$: 東京電力管内の 2012 年 8 月 30 日の 0:00-23:00 のデータを使用

$d_2(\lambda)$: 変動需要を以下のように定義

$$\text{対数効用関数 } u(d) := a \log(d)$$

$$\text{変動需要 } d_2(\lambda) := \arg\max_{d \geq 0}\{u(d) - \lambda d\} = \frac{a}{\lambda}$$

a, μ_1, μ_2 は正のパラメータで、

$$\underbrace{\sum_{t=1}^{24} D_t(\lambda_t^N)}_{\text{シミュレーションの需要の和}} \approx \underbrace{\frac{1}{100}\sum_{t=1}^{24} d_{1,t}}_{\text{スケーリングした実際の需要の和}}$$

となるように決定した。

$$a = 3.9 \times 10^4,\ \mu_1 = 0.008,\ \mu_2 = 0.2$$

$\delta_{2,t}$: $\mathcal{N}(0, 0.01^2)$ に従う確率変数 → 需要の不安定性を表す

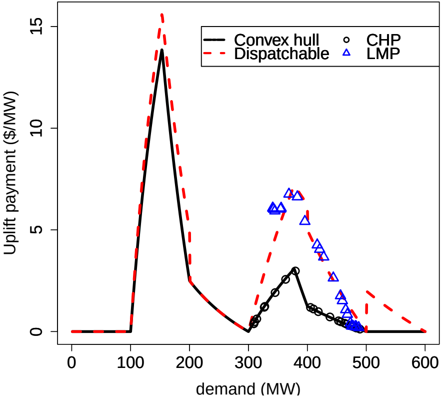


Figure : 最適解の比較

Convex hull

- Uplift payment の理論的な下限

Dispatchable

- NYISO で使われている手法で発生する Uplift payment

CHP

- 提案手法のシミュレーション結果

LMP

- 従来手法 (凸費用関数) のシミュレーション結果

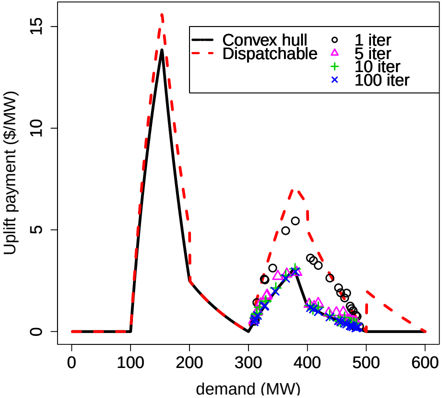


Figure : 提案アルゴリズムの収束の様子

提案アルゴリズム

- 近似解法
- 反復毎に供給家が 0-1 整数計画問題を解く必要

精度は？

少ない反復回数で十分小さい Uplift payment

まとめと今後の課題

まとめ

- 動的価格設定モデルに、起動停止問題を組み込んだ
- 社会効用最大化問題の双対問題 (D) を解くと、凸包価格が得られる
- 提案アルゴリズムは、少ない反復回数で、十分小さな動機付け価格 (Uplift payment) を達成

今後の課題

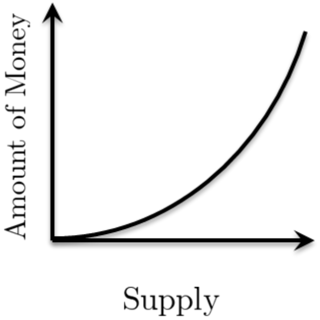
- 需要家・供給家が複数いるモデルに拡張する
- ネットワーク制約 (送電ロスなど) を考慮する
- 多期間モデルに拡張する

参考文献

- [1] M. Albadi and E. El-Saadany, “A summary of demand response in electricity markets,” Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 11, pp. 1989--1996, Nov. 2008.
- [2] New York ISO, “NYISO (About NYISO understanding the market the energy market),” http://www.nyiso.com/public/about_nyiso/understanding_the_markets/energy market/index.jsp, accessed: 2013-05-11.
- [3] M. Roozbehani, M. A. Dahleh, and S. K. Mitter, “Volatility of power grids under real-time pricing,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 1926--1940, Nov. 2012.
- [4] Y. Miyano and T. Namerikawa, “Load leveling control by real-time dynamical pricing based on steepest descent method,” in SICE Annual Conference, Akita University, Akita, Japan, 2012, pp. 131--136.
- [5] P. R. Gribik, W. W. Hogan, and S. L. Pope, “Market-clearing electricity prices and energy uplift,” Tech. Rep., 2007.
- [6] M. Bjorndal and K. Jornsten, “Equilibrium prices supported by dual price functions in markets with non-convexities,” European Journal of Operational Research, vol. 190, no. 3, pp. 768--789, Nov. 2008.
- [7] B. Zhang, P. B. Luh, and E. Litvinov, “On reducing uplift payment in electricity markets,” in Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE ’09. IEEE/PES, Mar. 2009.
- [8] D. P. Bertsekas, A. Nedic, and A. E. Ozdaglar, Convex Analysis and Optimization, ser. Optimization and Computation Series. Athena Scientific, 2003.
- [9] Tokyo Electric Power Company (TEPCO), “TEPCO electricity forecast,” http://www.tepco.co.jp/en/forecast/html/index-e.html, accessed: 2013-04-29.

付録

凸費用関数



仮定

$v(x_s)$: C^2-級、単調増加、凸関数
(解釈 : 発電単価の安い発電機から
順番に起動)
需要 d は所与

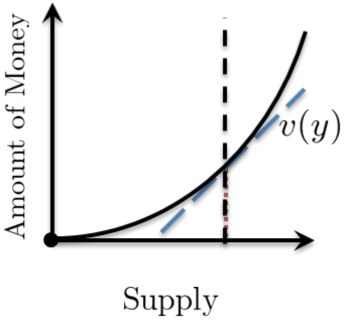
限界費用価格設定

価格 $p := \dot{v}(d)$

利点

$$d = \arg\max_{x_s}\{px_s - v(x_s)\}$$

凸費用関数



仮定

$v(x_s)$: C^2-級、単調増加、凸関数
(解釈 : 発電単価の安い発電機から
順番に起動)
需要 d は所与

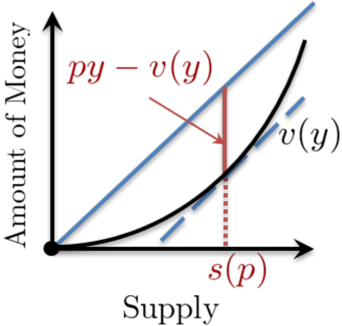
限界費用価格設定

価格 $p := \dot{v}(d)$

利点

$$d = \arg\max_{x_s}\{px_s - v(x_s)\}$$

凸費用関数



仮定

$v(x_s)$: C^2-級、単調増加、凸関数
(解釈 : 発電単価の安い発電機から順番に起動)
需要 d は所与

限界費用価格設定

価格 $p := \dot{v}(d)$

利点

$$d = \arg\max_{x_s} \{ p x_s - v(x_s) \}$$

北九州での実証実験

- レベル1～5　20円/50円/75円/100円/150円
- 固定＝22円
- ピーク時(13:00-17:00)の結果

	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5
単価 [円/KWh]	50	75	100	150
削減率 [%]	9.03	9.59	12.55	13.12

- 効果は出ている一方で，ある程度の値段になると削減率の変化が小さくなることも分かっている.