

# 不確実性を考慮した電力取引計画の検討

## Optimal Planning of Electric Power Trading Considering Uncertainty

新井 馨\*<sup>1</sup>      林 巨己\*<sup>1</sup>      石橋 直人\*<sup>1</sup>      飯坂 達也\*<sup>1</sup>  
 Kiyo Arai      Naoki Hayashi      Naoto Ishibashi      Tatsuya Iizaka

\*<sup>1</sup> 富士電機株式会社  
 FUJI ELECTRIC CO., LTD.

This paper develops optimal planning of electric power trading considering uncertainty. Given the revitalization of the electricity market in recent years, a business model for electric power arbitrage trading utilizing the combination of renewable energy such as PV and the grid-scale battery has been attracting attention. To realize this business model, forecasting trading price and solar radiation should be utilized to create an optimal plan that maximizes profits. However, there is a risk of decreased profits due to forecast errors. Therefore, this paper proposes a method for creating optimal planning of electric power trading considering uncertainty. To verify the effectiveness of considering uncertainty, daily electric power trading plans for the past year have been created utilizing the proposed method and evaluated with actual price and PV generation data. As a result, it has been verified that profits can be improved by 5.4% with the proposed method compared to a conventional method without considering uncertainty.

### 1. はじめに

電力小売自由化により、蓄電池と再エネ設備を用いて電力市場取引を行うビジネスモデルが注目されている。このビジネスモデルでは、電力価格が安い時間帯に電力購入して蓄電池へ充電し電力価格が高い時間帯に放電し売電、また、再エネのピークシフトを行うことにより収益を得る。このようなビジネスモデルを実現するには、再エネ発電量と電力市場価格の予測値を入力情報とし、収益を最大化するように最適化し電力の売買計画（以降、電力取引計画）を立案する必要がある。しかし、予測値が外れると収益が低下する。

本稿では、予測値が外れることを、最適化問題に対する不確実性として捉え、不確実な環境下でも高い収益を得るための電力取引計画の最適化方法について提案する。1年間のシミュレーション結果より、収益が改善した結果が得られたので報告する。

### 2. 不確実性を考慮した最適化方法

不確実性を考慮した最適化の主な方法として、ロバスト最適化や確率計画法がある[木下 25]。ロバスト最適化では、あらかじめ定義した不確実な範囲内で最悪な事態を想定して運用制約を満たす計画を立案する。確率計画法では、発生確率を持つ複数シナリオに対して、目的関数値の期待値を最大化する計画を立案する。また、上記の2つの方法以外に、金融工学の考え方を利用した方法もある。シナリオ別に計画を立案し、各計画の基本統計量などを算出し計画を評価する[佐野 18, 湯前 00]。

筆者らは、これまで電力取引計画の最適化モデルをモデリングした[林 25]。このモデルは、蓄電池を活用した卸電力市場と需給調整市場を対象とした最適化モデルである。また、筆者らは、これまで翌日の電力市場価格と再エネ発電量の予測値と、その外れ度合いを求める研究を行ってきた[石橋 24, 池川 25]。この技術から電力市場価格が高いケース、低いケースなどシナリオを求めることが容易である。本稿では、上記の最適化モデルやシナリオ作成の既存技術を活用するため、前述の3つ目の金融工学の考え方を利用した方法を用いる。シナリオ別に最適

化モデルに対して電力取引計画を立案し、シナリオにより各計画を統計的に評価し不確実な環境下でも高い収益を得られる計画をユーザに推奨する。

### 3. 不確実性を考慮した最適化方法の電力取引計画への適用方法の提案

今回対象とする設備構成は、太陽光発電設備と蓄電池である(図 1)。最適化の対象は、1日を30分刻みで分割した際の48時点(48 コマの商品) のいずれの時間に売電するか買電するか(入札タイミング)、及びその入札量である。不確実性要素とは、太陽光発電量(以降、PV 発電量)、電力市場価格、インバランス価格の3つである。不確実性を考慮した電力取引計画とは、1日の収益の期待値が高い計画を推奨するものである。

本提案は、シナリオ作成、計画立案、計画推奨の3つの機能からなる。

#### 3.1 シナリオ作成

シナリオとは、1日分の予測値であり、予測の外れ方を考慮したデータである。例えば、PV発電量が多いシナリオ、PV発電量が少ないシナリオなど複数のシナリオからなる。本シナリオ作成機能で作成するシナリオは、後述 3.3 節の計画推奨機能で各計画の統計的な評価に用いられるため、発生確率に従って作成する必要がある。本稿では、予測誤差分布をベースとした2種類のシナリオ作成方法を用いてシナリオを作成する。1つ目の方法は、誤差幅の範囲内で正規分布を仮定してシナリオを作成する(図 2-a)[石橋 24]。2つ目の方法は、誤差の実際の密度分布に従ってシナリオを作成する(図 2-b)。それぞれの不確実性要素(PV 発電量、電力市場価格、インバランス価格)に対してこの2つの方法で作成したシナリオを利用する。

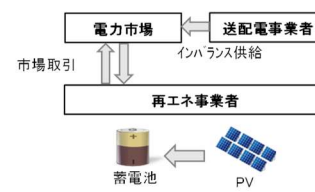
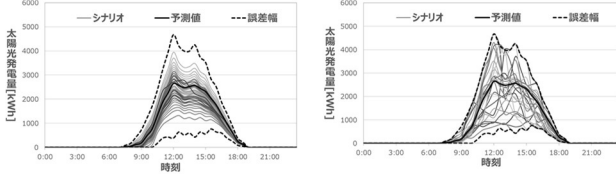


図 1 対象モデル

連絡先: 新井馨, 富士電機(株), arai-kiyo@fujielectric.com



a. 正規分布を仮定

b. 実際の密度分布を利用

図2 シナリオの作成方法

### 3.2 計画立案

3.1節で作成した電力市場価格シナリオ、PV発電量シナリオを計画立案用シナリオ(以降、立案用シナリオ)として前述の対象最適化モデルに入力し1日分の電力取引計画を立案する。制約条件として、蓄電池の容量、定格入出力、SOC上下限值、充放電効率、対象電力市場の最低入札量、入札単位などがある。例えば、PV発電量が多いシナリオ、少ないシナリオの2つがある場合には、それぞれに対応した2つの電力取引計画を求める。以下に最適化モデルの目的関数を示す。

$$obj(i) = \max \{profit(i)\} \quad (i=1 \sim I)$$

$$profit(i) = \sum_{t=1}^T \{SPOT_{in}(t,i) - SPOT_{ex}(t,i)\} \quad (i=1 \sim I)$$

$$SPOT_{in}(t,i) = SPOT_{price}(t,i) \times SPOT_{sell}(t,i) \quad (t=1 \sim T)$$

$$SPOT_{ex}(t,i) = SPOT_{price}(t,i) \times SPOT_{buy}(t,i) \quad (t=1 \sim T)$$

ここで、 $i$ :立案用シナリオ番号、 $I$ :立案用シナリオ数、 $profit(i)$ : $i$ 番目の立案用シナリオで立案した計画*i*における電力取引での収益[円]、 $SPOT_{in}(t,i)$ : $i$ 番目の立案用シナリオにおける時点*t*での売電収入[円]、 $SPOT_{ex}(t,i)$ : $i$ 番目の立案用シナリオで立案した計画*i*における時点*t*での買電費用[円]、 $SPOT_{price}(t,i)$ : $i$ 番目の立案用シナリオで立案した計画*i*における時点*t*での電力市場価格[円/kWh]、 $SPOT_{sell}(t,i)$ : $i$ 番目の立案用シナリオで立案した計画*i*における時点*t*での売電電力量[kWh]、 $SPOT_{buy}(t,i)$ : $i$ 番目の立案用シナリオで立案した計画*i*における時点*t*での買電電力量[kWh]、 $T$ :30分刻みで分割した際の時点数。

### 3.3 計画推奨

3.1節で作成した電力市場価格シナリオ、PV発電量シナリオ、インバランス価格シナリオを計画評価用シナリオ(以降、評価用シナリオ)として、3.2節で立案した計画を評価し、期待収益が最も高い計画を推奨する。期待収益とは、該当電力取引計画に様々な評価用シナリオを与えた時の収益の期待値である。期待収益の計算式を以下に示す。

$$RETURN(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{profit'(i,n) - IM_{CHARGE}(i,n)\} \quad (i=1 \sim I)$$

$$profit'(i,n) = \sum_{t=1}^T \{SPOT_{in}'(t,i,n) - SPOT_{ex}'(t,i,n)\} \quad (I=1 \sim I, n=1 \sim N)$$

$$SPOT_{in}'(t,i,n) = SPOT_{price}(t,n) \times SPOT_{sell}(t,i) \quad (I=1 \sim I, n=1 \sim N, t=1 \sim T)$$

$$SPOT_{ex}'(t,i,n) = SPOT_{price}(t,n) \times SPOT_{buy}(t,i) \quad (I=1 \sim I, n=1 \sim N, t=1 \sim T)$$

$$IM_{CHARGE}(i,n) = \sum_{t=1}^T \{(PV(t,i) - PV(t,n)) \times IM_{PRICE}(t,n)\} \quad (I=1 \sim I, n=1 \sim N, t=1 \sim T)$$

ここで、 $n$ :評価用シナリオ番号、 $N$ :評価用シナリオ数、 $RETURN(i)$ : $i$ 番目の計画の期待収益[円]、 $profit'(i,n)$ : $n$ 番目の評価用シナリオを与えた時の*i*番目計画の収益[円]、 $IM_{CHARGE}(i,n)$ : $n$ 番目の評価用シナリオを与えた時の*i*番目計画のインバランス費用[円]、 $SPOT_{in}'(t,i,n)$ : $n$ 番目の評価用シナリオを与えた時の*i*番目計画の時点*t*での売電収入[円]、 $SPOT_{ex}'(t,i,n)$ : $n$ 番目の評価用シナリオを与えた時の*i*番目計画の時点*t*での買電費用[円]、 $PV(t,i)$ : $i$ 番目の立案用シナリオの時点*t*でのPV発電量[kWh]、 $PV(t,n)$ : $n$ 番目の評価用シナリオの時点*t*でのPV発電量[kWh]、 $IM_{PRICE}(t,n)$ : $n$ 番目の評価用シナリオの時点*t*でのインバランス価格[円/kWh]。

### 4. シミュレーション

#### 4.1 シミュレーション条件

評価条件を表1に示す。本稿では、電力市場であるスポット市場を対象としてシミュレーションを実施する。スポット市場の取引条件として、前日10時に翌日1日分48時点を入札する。

シナリオ作成機能では予測値から複数のシナリオを作成する。今回、PV発電量予測値のみを不確実性要素として扱い、電力市場価格予測値(スポット市場価格)とインバランス価格予測値は不確実性要素は未考慮とした。予測手法については、PV発電量はアンサンブル気象予報を用いた日射量予測手法[池川25]を用い、スポット市場価格とインバランス価格は決定木を用いた誤差分布モデル[石橋16]を用いる。不確実性要素のシナリオ構成は、予測値、誤差幅の範囲内で正規分布を仮定したシナリオ作成方法(図2-a)により作成した30シナリオ、及び直近30日間の予測誤差の実際の密度分布から作成した30シナリオ(図2-b)からなる。

計画立案機能では、作成したシナリオを最適化モデルに入力し、最適化ソルバーGurobi 9.1.2を用いて1日分48時点の電力取引計画を立案する。計画推奨機能では、シナリオ別に立案した電力取引計画の中から期待収益が最も高い計画を推奨する。収益の評価は、推奨計画で取引を行った場合の収益を電力市場価格、PV発電量、インバランス価格の実績値により算出する。1年間繰り返し収益を計算する。

提案法の有効性を検証するために、日々の理論上最大収益を獲得できる電力取引計画(即ち、実績値で立案した計画)、及び不確実性考慮なしの場合の電力取引計画(即ち、予測値のみで立案した計画)による年間収益と比較する。

#### 4.2 シミュレーション結果

表2に、年間の理論上最大収益、不確実性考慮なしの場合の収益、及び本提案法による不確実性を考慮した場合の収益の比較を示す。提案した不確実性を考慮した電力取引計画の

表1 評価条件

項目	条件
評価対象期間	2022年4月1日～2023年3月31日
対象エリア	九州
対象商品	スポット市場
PV定格出力	10MW
蓄電池定格出力・容量	10MW, 42MWh
蓄電池充放電効率	上限:90%, 下限:10%
蓄電池SOC上下限	81%(充電:90%, 放電:90%)

最適化方法は、不確実性考慮なしの場合に対して 5.4%の収益改善を得られることを確認できた。

提案法が不確実性考慮なしの場合に対して収益改善できた理由について考察する。図 3 は、スポット市場価格の実績値の年間平均を示している。図 3 より、理論上最大収益を獲得するためには、蓄電池を活用しできるだけ 18:30 に売電すべきであることが分かる。図 4 は、不確実性考慮なし・ありの各時点の計画売電電力の年間合計を示している。本提案法による推奨計画の 18:30 における売電量は、不確実性考慮なしの場合より多いことから収益改善が実現できた。本提案法が 18:30 により多く売電計画を立案できた理由を図 5 に示す。図 5 の横軸は、シナリオ作成に用いられた PV 発電量の予測値の信頼区間 ( $3\sigma$ ) の上限と下限の差であり、縦軸は、スポット市場価格である。不確実性考慮ありの場合は、この信頼区間の上限と下限の差が小さい(即ち、リスクが小さい)、かつ、価格が高い時点(18:30)に売電する計画を推奨できるから、不確実性考慮なしより収益の改善ができた。

## 5. まとめ

本稿では、不確実性を考慮した最適化方法の電力取引計画への適用を提案した。提案法は、不確実性考慮なしの場合に対して 5.4%の収益改善を得られることを確認できた。

今回は、不確実性要素を PV 発電量の一種類のみとした。今後は、複数種類の不確実性要素を用いた場合のシナリオの組み合わせ方法の検討、及び効果検証を行う。

本研究は、国立大学法人東京大学 エネルギー総合学連携研究機構と共同で開設した社会連携研究部門「電力システムイノベーションの実現」による成果である。

## 参考文献

- [木下 25] 木下 喜仁・内海 将人・今井 浩太: 不確実性リスクを抑制する燃料運用を含めた発電計画, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), 145 巻 1 号 p. 55-66, 2025.
- [佐野 18] 佐野正裕・内藤健人・平野秀明・広瀬公一: 損益リスク定量化のためのモンテカルロ法高速化に関する検討, 電気学会全国大会, 2018.
- [湯前 18] 湯前祥二・鈴木輝好: 「モンテカルロ法の金融工学への応用」, 2000.
- [林 25] 林 巨己・新井 馨・石橋 直人・岡林 弘樹・飯坂 達也: 系統用蓄電池事業者の収益性に関する基礎検討, 電気学会全国大会, 2025.
- [石橋 24] 石橋 直人・増田 達矢・池川 聖悟・飯坂 達也・松井 哲郎: スポット市場価格における信頼区間推定に関する一検討, 電気学会全国大会, 2024.
- [池川 25] 池川 聖悟・石橋 直人・飯坂 達也: アンサンブル気象予報を用いた日射量予測の一検討, 電気学会全国大会, 2025.
- [石橋 16] 石橋直人・樺澤明裕・飯坂達也・勝野徹: 「需要予測における誤差要因を考慮した信頼区間推定手法」, 電気学会論文誌 B, Vol.136, No.6, pp.775-783, 2016.

表 2 年間収益の比較

ケース	収益[%]
理論上最大収益 (実績値利用)	100.0%
不確実性考慮なし(予測値のみ利用)	87.9
不確実性考慮あり(提案法)	92.7

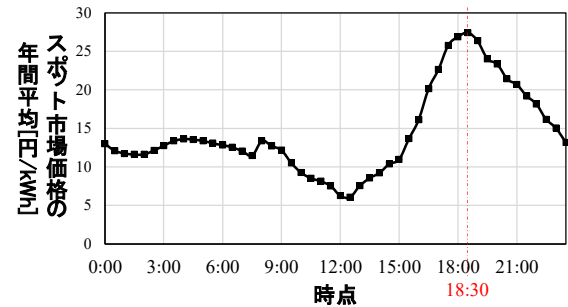


図 3 スポット市場価格の年間平均

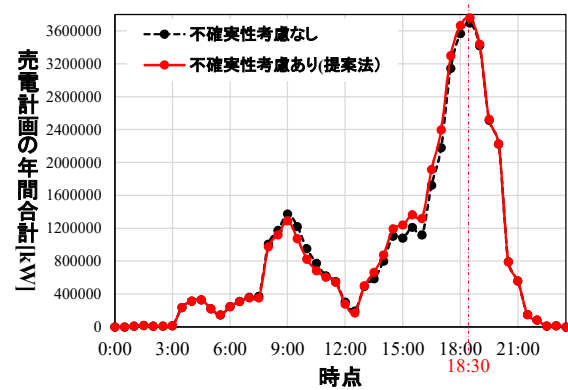


図 4 不確実性考慮なし・ありの場合の売電計画

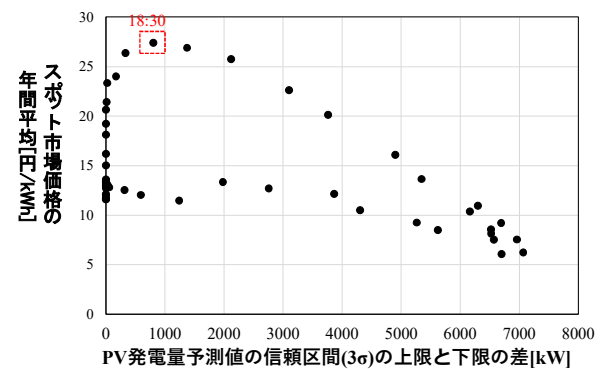


図 5 PV 発電量予測値の信頼区間 ( $3\sigma$ ) の大きさとスポット市場価格の関係