

ロバスト最適化による再エネ抑制と公平性を考慮した発電計画

東芝エネルギーシステムズ	*豊嶋伊知郎	TOYOSHIMA Ichiro
理研 AIP	ポアリオンピエールルイ	POIRION Pierre-Louis
東芝エネルギーシステムズ	山崎朋秀	YAMAZAKI Tomohide
東芝エネルギーシステムズ	矢口航太	YAGUCHI Kota
東芝エネルギーシステムズ	久保田雅之	KUBOTA Masayuki
東芝エネルギーシステムズ	水谷遼太	MIZUTANI Ryota
東京大学	武田朗子	TAKEDA Akiko

1. はじめに

電力会社は翌日の発電計画を数理最適化問題を解くことで作成している。この問題は Unit Commitment(UC) 問題と呼ばれている。従来より UC 問題は電力需要 (需要) の不確実性が課題であったが、近年では PV に代表される再生可能エネルギー¹の不確実性にも対処する必要がある。通常 UC 問題の計算では需要および PV 発電電力量は予測値が用いられる。近年の機械学習技術の進歩により、予測の精度は大幅に向上している。しかし統計的手法の本質上、事前の傾向から外れた現象を予測することには限界があり、不確実性を完全に除去することはできない。電力システムの安全性を保持する観点では、需要・PV の予測誤差を前提とした発電計画が必要となる。さらに最近では、同じく安全性の観点から PV の発電抑制も検討されてきており、抑制指示も含みこんだ計画であることが実用面で望ましい。

我々は不確実性を扱う数理最適化手法としてロバスト最適化 [1] に注目している。不確実性の最悪ケースにおける最良解を計算するというロバスト最適化の特徴は、安全性を重視する発電計画に適したアプローチである。

2. RE-RP

ロバスト最適化を UC 問題に応用した例には、需要の不確実性を考慮した Bertsimas らの研究 [2] がある。我々は需要に加えて PV の不確実性を追加し、さらに抑制指示も取り込んだモデル Renewable Energy Robust optimization Problem(RE-RP) を考案した。RE-RP の目的関数は式 (1)、需給一致

制約は式 (2) で示される。最低運転時間などの制約も考慮しているが、スペースの都合で省略する。

$$\min_{x,u,v,r,p,q} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} x_i^t F_i^t + u_i^t S_i^t + v_i^t G_i^t + C_i^t p_i^t + \sum_{l=1}^{N_p} \Pi_l^t r_l^t \right) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N_g} p_i^t + \sum_{l=1}^{N_p} z_l^t = \sum_{j=1}^{N_d} d_j^t, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (2)$$

計画期間を $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, T\}$ で表す。 N_g は火力発電機数、 N_p は PV 数、 N_d は需要家数である。 x, u, v はそれぞれ運転中・起動タイミング・停止タイミングを示す 0-1 変数であり、 F, S, G はそれぞれに対応したコスト定数である。 r は PV の抑制指示を示す 0-1 変数であり、 Π は PV の抑制指示の補償コストに対応する。 p は火力発電機出力、 z は PV 出力、 d は需要の電力量である。 C は対応する火力発電機のコスト定数である。

不確実な需要と PV は、不確実性変数 ζ, η を用いてそれぞれ式 (3)(4) で定義される。

$$d_j^t = \bar{d}_j^t + \zeta_j^t \hat{d}_j^t \quad (3)$$

$$z_j^t = (\bar{z}_j^t - \eta_j^t \hat{z}_j^t)(1 - r_j^t) \quad (4)$$

\bar{d}, \bar{z} は予測結果の指示値である。 \hat{d}, \hat{z} は不確実性を見込む最大幅である。とくに $r = 1$ のときつまり抑制指示がある場合には、 $z = 0$ となり対応する不確実性変数は無効化される。無効化、言い換えれば不確実性集合の形状が決定変数の選択により変化することは、RE-RP の理論面の特徴である。

¹再生可能エネルギーには様々なものがあるが、本稿では PV に焦点をあてて議論する。

以上の準備の上で、RE-RP は次の min-max-min 問題として表現される (制約条件は省略).

$$\min_x \left(c^\top x + \max_{\zeta, \eta \in \mathcal{D} \times \mathcal{Z}} \left(\min_{y \in \Omega(x, \zeta, \eta)} b^\top y \right) \right) \quad (5)$$

$$x \in \{0, 1\}^n$$

最初の min は全ての x と r による起動・抑制の割当における最悪ケースのコスト最小化を行う。次の max は各割当におけるコスト最悪ケースを実現する。最後の min は起動・抑制が決まった上での最悪ケースにおいてコスト最小化の出力を決定する問題である。後半の max-min 問題は min の双対問題を考えることで一つの max 問題とすることができる。得られた max 問題を Recourse 問題と呼ぶ。RE-RP は文献 [3] と同様に Benders Decomposition の戦略によって最適解を得ることができる。

3. 評価

我々は先行研究にて火力発電機と PV がそれぞれ 10 台前後のシミュレーションを実施し、RE-RP が単純な UC 問題に比べて当日の火力発電機の追加起動を防ぐ効果があることを確認した [4]。計画外の追加起動は、系統運用上避けるべきオペレーションである。

ロバスト最適化により得られた解の目的関数値は、単純問題のそれよりも悪化する。つまりロバスト最適化の経済的効果は、最悪ケースの損害をどの程度評価に参入するかに依存して決まる。今後は事例検討を通じて最悪ケースの評価を精緻化し、手法の有効性実証をすすめる。

4. 拡張:PV 間の公平性

個々の PV の所有者が異なる場合には、発電機会の公平性に配慮する必要がある。RE-RP with Equal Opportunity(w/EO) は、RE-RP の目的関数に PV 発電電力量の分散を罰金項として追加したものであり、PV 発電電力量の偏りを抑制することができる [5]。RE-RPw/EO の目的関数は、式 (6) である。

$$\min_{x, u, v, r, p, q} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} x_i^t F_i^t + u_i^t S_i^t + v_i^t G_i^t + C_i^t p_i^t + \sum_{l=1}^{N_p} \Pi_l^t r_l^t \right) + \gamma V(z) \quad (6)$$

$V(z)$ は PV ごとの 1 日の総発電電力量の分散を計算する多項式関数である。 γ は調整用の非負定数である。更にロバスト最適化問題は式 (7) となる。

$$\min_x \left(c^\top x + \max_{\zeta, \eta \in \mathcal{D} \times \mathcal{Z}} \left(\Phi(\eta, \zeta, r) + \min_{y \in \Omega(x, \zeta, \eta)} b^\top y \right) \right) \quad (7)$$

max 問題中の $\Phi(\eta, \zeta, r)$ が目的関数の罰金項 $V(z)$ に相当する。この min-max-min 問題も RE-RP の場合と同じく Benders Decomposition によって解くことができる。

5. おわりに

本稿ではロバスト最適化を応用した PV 抑制を考慮した UC 計画である RE-RP と、さらに PV 間の公平性も含んだ RE-RPw/EO を紹介した。今後は経済的有効性と公平性実現効果を実証していく。

参考文献

- [1] 武田：“ロバスト最適化法とその動向”，電気学会論文誌 C, 第 134 巻, pp. 760–764 (2014).
- [2] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao and T. Zheng: “Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem”, IEEE Transactions on Power Systems, **28**, 1, pp. 52–63 (2013).
- [3] T. Terry, M. Epelman and A. I. Thiele: “Robust linear optimization with recourse”, technical report, Lehigh University (2009).
- [4] T. Yamazaki, P.-L. Poirion, I. Toyoshima, K. Yaguchi, M. Kubota, R. Mizutani and T. Akiko: “Robust optimization for unit commitment problem considering suppression of renewable energy: Analysis of numerical experimental results”, Proc. of CIGRE Symposium 2022 (Poster), pp. 79–84 (2022).
- [5] I. Toyoshima, P.-L. Poirion, T. Yamazaki, K. Yaguchi, M. Kubota, R. Mizutani and T. Akiko: “Equal opportunity in robust optimization for unit commitment problem considering suppression of renewable energy”, IEICE Technical Report(MSS), Vol. 122, pp. 7–12 (2022).