

調整力抽出と電気料金を考慮した工場内工程最適化方式

In-plant process optimization method considering flexibility extraction and electricity charges

春名高明[†] 阿部和裕[†]
Takaaki Haruna Kazuhiro Abe

吉内英也[†] 朴勝煥[†]
Hideya Yoshiuchi Seunghwan Park

1. 背景と課題

この脱炭素社会実現に向けた取り組みが世界中で加速されていく中、国内でも再生可能エネルギー(再エネ)電力比率向上が求められている。そのためには出力変動や予測誤差に対応して送配電網の電力需給バランスを維持するために過不足を補う調整力が必要不可欠である。国内で調整力確保の役割を担う一般送配電事業者は、2016年10月より調整力公募を毎年実施し必要な調整力をエリア内で確保してきた。また、2021年4月からはエリアを越えた広域的な調整力の調達・運用と、競争原理によるコスト低減を図るため需給調整市場を開設し取引を行っている[1][2]。市場運営者である各エリアの一般送配電事業者は、調達を希望する調整力の必要量を提示し、調整力の提供事業者が当該必要量に対して入札を行う。この提供事業者はアグリゲーションコーディネータと呼ばれ、個々のリソースアグリゲータが電力リソースの制御を行うことで得られる調整力を統合し、商品として調整力市場に供給する。調整力市場では地域ごとの送配電網における調整力の需給状況に応じて取引価格が推移する。一般には空調設備の稼働が活発となる真夏や真冬における人々の活動時間帯に、調整力不足への懸念から取引価格の高騰がみられる。

一方で、エネルギー情勢の変化による電気料金の高騰は今後も続くことが予想されている[3]。このため電力需要家においては増大する電気料金支出の削減に対する要求が非常に高まっている。日本における電気料金は、定額料金と従量料金との組み合わせた2部料金制が一般的であるが、近年では電力取引市場の価格と連動した料金制度も登場しており、各需要家は支出をより低く抑えるための手立てを模索している。

工場は大口の電力需要家であることから電気料金の高騰が収支に大きく影響するため電気代支出の削減が急務となっている。また、2022年の省エネ法改正により工場においても電力供給に対する消費の最適化が求められるようになり、環境への配慮と経済性の両立が求められている[4]。

2. 工場内工程最適化

工場は消費電力が大きい一方でその消費が生産活動と連動しており、消費の予測や制御が比較的容易という特徴がある。これを活かし、工場の生産活動を制御することで生じるネガワット(消費削減による見かけ上の発電)を上記の調整力に充当しようという取り組みが始まってきている。工場は調整力をアグリゲータを経由して市場に提供する対価として金銭を得ることができる。

工場の中の生産設備を停止することで消費電力の削減は可能であるが、単純に要求された時間帯に設備を停止した

り出力を落としたりすれば製品の生産量や品質に影響を及ぼすことになり、これは工場にとっての損失となる。工場での生産における制約条件を考慮して個々の生産工程を時間的にシフトさせることにより、生産物の量・品質に影響を及ぼすことなく、工場の電力消費を加減することが可能となると考えられる。工程シフトのイメージを図1に示す。

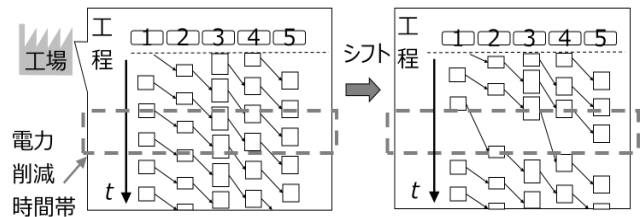


図1: 工程シフト

調整力抽出および市場への供給による対価の獲得と、電気料金支出の削減が工場にとっての工程シフトの経済的モチベーションであり、工程配置の組み合わせによりこれをより大きくすることが求められる。

調整力の提供対価すなわち売却益は需給調整市場の取引価格によって以下のように定まると仮定した。

調整力売却益 =

当該時間帯の取引価格×電力下げ幅×継続時間

− 手数料率×継続時間

需給調整市場の取引価格推移から最大となる時間帯を選択し、その間の電力消費量を所定の範囲内に抑えることで上記の売却益を得られると仮定する。

一方の電気料金については、そもそも時間変動がなければ工程をずらすことに意味がなく、再エネ法等に基づく供給への需要最適化が今後さらに強く求められると考えられることから、変動料金制を前提として以下の式で試算した。

電気料金 = 基本料金

+ 電力量料金単価×使用電力量

+ 再生可能エネルギー発電促進賦課金単価×使用電力量

本研究では上述の調整力売却益を最大とする消費抑制時間帯を設定した上で、生産制約のもとでこの電気料金支出の削減を最大とするように工程調整を実施する「工程最適化機能」を試作した。

3. 工程最適化機能の実装

今回試作した工程最適化機能では、工程ごとに消費電力および所要作業時間を設定し、設定した電力削減の時間帯およびその時間帯における要求消費電力値を満たした上で全工程における電気代を最小とする工程の組み合わせを整数計画問題として求める。

計画問題のモデルとして、金属工場を大量の電力を消費するユースケースとして採用した。本ユースケースでは複数の加熱設備を使用し、材料となる金属を投入後加熱溶解、所定の温度に到達したのち型に流し込む(出湯)という作業

[†](株)日立製作所 研究開発グループ

Hitachi, Ltd. Research & Development Group

を繰り返す。計画問題の目的関数やパラメータ、制約条件を以下に示す。

目的関数 : 電気料金の総額

$$\text{minimize } obj = \sum_{f \in F} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} w_{f,c,t,s} \cdot p_s \cdot b_t$$

f : 加熱設備

c : 工程周回(Cycle), 何回目の工程か

t : 時間スロット(10分刻み), 24時間で $6 \times 24 = 144$ 個

s : 工程がとりうる状態(投入, 加熱, 出湯, 等)

p_s : 状態 s の工程の1スロット(10分)に必要なとする電力

b_t : 時間スロット t における電気料金

最適化変数(バイナリ)

$w_{f,c,t,s}$: 設備 f における c 回目の工程が時刻 t において状態 s で実行中である (実行中=1, 非実行中=0)

$d_{f,c,t,s}$: 設備 f における c 回目の工程が時刻 t において状態 s で実行済である (実行済=1, 非実行済=0)

制約条件(抜粋)

(1) 消費削減時間帯の消費電力は p_{DR} を超えない

$$\forall t \quad (t_{DRbegin} \leq t \leq t_{DRend}) \quad \sum_{f \in F} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} w_{f,c,t,s} \cdot p_s \leq p_{DR}$$

(2) 同時に加熱実行可能な台数制限 (契約電力上)

$$\forall t \quad \sum_{f \in F} \sum_{c \in C} w_{f,c,t,"heat"} \leq 2$$

(3) 加熱溶解 60分後までに出湯を完了させる (品質上の制限)

$$\forall f, c, t \quad (t \leq t_{end} - 6) \quad d_{f,c,t+6,"output"} + d_{f,c,t,"heat"} \geq 0$$

これに時刻ごとの電気料金や各工程実行に必要な時間, 溶湯の保持可能時間などのデータを設定するとともに, 上述以外にも工程に関する様々な制約(工程間の前後, 依存関係, 工程同時実行可能数, 設備排他利用, 最大消費電力, 等)を加えて整数計画問題ソルバの `gurobi`[5]に与えることで, 電気料金最小のときの各々の設備および時間スロットにおける工程の実行状態が求められる。

4. 評価

上記のユースケースについて, 現実の工場に即した内容でパラメータを設定するとともに, 電力卸取引市場における実際の取引価格をもとに算出した時間帯ごとの電気料金を設定して工程最適化機能による計算を実施した。通常の昼夜シフトで通常に作業を実施した場合の電気料金についても同様に算出を行い, 結果を比較した。

2. に示した概算電気料金算出方法に基づき 10分スロットごとに電気代を工程実行状態に基づき積算, 3基の電気炉について集計した結果, 料金および工程調整による差額は以下ようになった。

・電気料金を考慮しない場合(A) : 491,372 円

・電気料金を考慮し机上で工程変更した場合(B) : 461,292 円

・差額(A-B) : 30,080 円

工程変更により消費下げ幅が確保できた時間帯について調整力を市場で売れた仮定で売却益を試算した。

・加熱設備 3基について一日平均 3,229kW の消費

・工程変更で 150kW → 差分 3,079kW、3,000kW 調整量落札と仮定

・3,000kW × (3hr × 2) × (2.07 - 0.02) = 37,874 円 : 売却益

これにより, 先の電気料金差額 30,080 円と合わせ 67,954 円の利益が得られる試算となった。もとの電気代 491,372 円に対して 67,954 円の差額が生じ, 本ユースケースでは単純計算で約 14%の経済的効果が生じたと考えることができる。

工程変更により調整力 3,000kW × 3hr = 9,000kWh を抽出し, それをカーボンフリーの再エネ発電量に余裕がある他の時間帯での実行に回している。これは, CN の観点からは消費電力の削減に相当する効果があると考えられることから, 一日の消費電力量約 77,000kW に対して約 12%の消費削減相当の CO2 排出量削減と考えることができる。

5. まとめ, 今後の課題

電力料金の時間変化情報と調整力市場の取引価格推移情報をもとに, 電気代削減と調整力対価獲得の観点から工場の支出を最小化する計画問題を解くことで工程配置案を求める方式を提案し, 工程最適化機能を試作した。金属工場をユースケースにした評価結果からは約 14%の経済的効果を試算によって得た。

工程に関する品質上の要件や実際の操業状況などを参考に定義した工程制約に加えて日ごとの価格動向や市場取引情報を与えて再計算させることにより, 大きな手間をかけずに適切な工程配置を得ることが可能となる。

今回は制約条件を品質維持の観点で整理したが, 勤務時間の変更や深夜残業の発生など, 工程変更には人的要因に起因する制約や追加コストの発生などを考慮に加える必要がある。これを効率よく実行するには現場からの要件吸い上げから制約条件に変換するまでの仕組みが重要となる。

その一方で制約を追加していくことにより, 工場単体での実行可能解が求められなくなる可能性がある。そもそも現在調整力に要求される応動時間は短く[6], 工場が受けるからの工程変更が間に合うようには設計されていない。ひとつの工場で調整力要求に対応することは困難であり, 他の工場の工程変更と統合(アグリゲーション)して調整するといった対応をとる必要がある。また, 工程変更や調整力の市場提供をタイムリーに実行可能とするためには最適化計算時間の短縮も今後の課題となる。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁, “需給調整市場について,” (2022)
- [2] 送配電網協議会, “需給調整市場とは,” online
- [3] 資源エネルギー庁, “エネルギー白書 2023,” (2023)
- [4] 資源エネルギー庁, “令和4年度第2回工場等判断基準WG改正省エネ法に基づく措置について,” (2022)
- [5] G. O. Inc, “Gurobi,”: <https://www.gurobi.com>
- [6] 経済産業省, “需給調整市場(三次調整力②)の運用状況について,” 2022