

データセンタの再エネ化支援に向けた再エネ需給調整最適化手法 RE-energy supply and demand adjustment optimization method for decarbonization of data centers

田中 紘¹⁾ 熊谷 敦也¹⁾ 小澤 洋司¹⁾
Hiro Tanaka Atsuya Kumagai Yoji Ozawa

概要

気候変動対策として、データセンタの再エネ化が進んでいる。再エネ導入促進のため、再エネ需給の不一致解消を目的に複数事業者間で連携を行う再エネ需給調整計画最適化を研究した。従来技術では、各事業者の使用エネルギーの種類(再エネ/非再エネ)を区別せず、各事業者の再エネ化等の目的を考慮できないという課題があった。そこで、運用計画と同時に各タイムブロックの再エネ使用量を計画することで各事業者の再エネ化等の目的に対して最適な計画を作成し、総再エネ使用量を元に再エネ融通価格の適正化を繰り返す方式を検討した。再エネ需給調整未実施に比べ、各事業者の目的達成を支援しつつ再エネ需給の不一致 22%減の試算結果を得た。

1 はじめに

近年、気候変動対策、また、社会的な脱炭素化への圧力を受け、再生可能エネルギー(再エネ)の利用が進められている。データセンタ(DC)においては、世界全体の消費電力の1%を占める大口需要化であること、生成・消費されるデータ量の爆発的な増加により、消費電力の爆発的な増加が予測されている[1]ことから、多くの企業で脱炭素化の取り組みが行われている。特に、Amazon Web Services(AWS)、Google、Microsoftを始めとする先進的なクラウドサービス事業者は、DCの脱炭素化をアピールすることで自社事業の成長につなげる動きを推進しており[2][3][4]、従来の、年間を通じた消費電力に相当する非化石証書の購入による年間単位の再エネ化から、実際に購入した再エネと消費電力の時刻を一致させる時間単位の再エネ化が進められている。

一方で、時間単位の再エネ率の向上には、再エネ発電の不安定性による課題を伴い、DCの消費と再エネの供給が時間的に一致しない場合、全体では分量での再エネを調達しているにも関わらず、再エネによる稼働ができない時間帯が発生してしまう。これに対し、再エネの豊富な所にワークロード(WL)を時間的・地理的にシフトさせるWLシフト[5]や、蓄電池の利用といった対策がなされているが、コストが膨大になる、リスクが大きいといった課題が残る。これに対し、複数事業者による再エネ合同調達、再エネ融通が行う事例があり[6]、全体として再エネの供給に消費を一致させればよいため、リスクの削減に有効であると考えられる。

同様に電力融通を行う電力系統管理者や仮想発電所(VPP)等においても、再エネの不安定性は課題であり、再エネ供給が過剰な場合は系統安定性のためにPV等に出力抑制が行われ、本来発電できたはずの再エネが廃棄される可能性がある。これに対し、分散エネルギー源(DER)や工場等の配下事業者の運用計画を需給の不一致を解消するように最適化する協調運用計画最適化による対策が提案されている[7]。

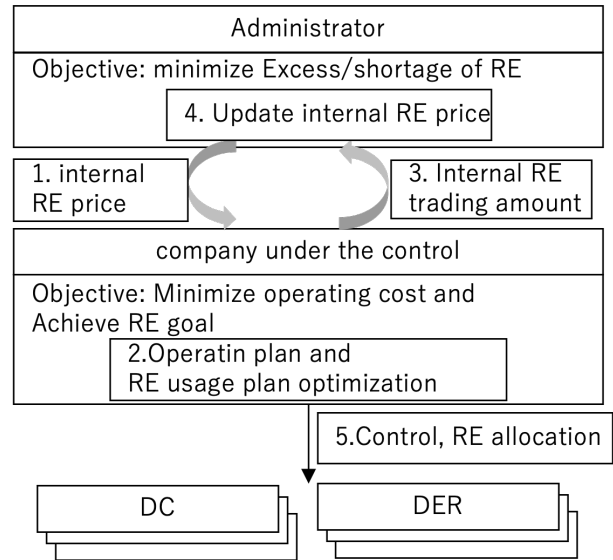


図1 提案手法の概要

時間単位で再エネ率向上を目的とするDC事業者を配下事業者として含む協調運用計画最適化は、これらの課題解決に有望であると考えられる。DCにおいては他事業者との再エネ融通による再エネ利用の増加が見込め、管理者においては大口需要家であるDCのWLシフトを含めて計画可能になることで再エネ過不足の減少が見込める。そこで、本研究では、時間単位再エネ率向上を目的とするDC事業者を含む協調運用計画最適化を目的とした。

既存の協調運用計画最適化手法をそのまま適用しようとすると、DCの制御対象に当たるWL情報を協調運用計画作成者(管理者)に提供する必要がある、各事業者が利用するエネルギーの種類(再エネ/非再エネ)を区別しない、コスト最小を目的としていることを前提としているため事業者ごとの目的の違いを考慮できないといった課題がある。本研究では、これらの課題解決のため、管理者から配下事業者への再エネ価格送信、配下事業者の運用計画最適化、配下事業者から管理者への再エネ調達希望量の送信、管理者の再エネ価格更新を繰り返す事による再エネ価格の階層的最適化手法を提案する(図1)。特に、配下事業者の運用計画最適化において、運用計画と同時に各タイムブロックの再エネ使用量を各事業者の再エネ化等の目的に対して最適な計画を作成する。提案手法について、各事業者が個別に運用計画を作成(非協調運用)した場合と比較実験を行い、各事業者の目的達成を支援しつつ再エネ需給の不一致 22%減の試算結果を得た。

2 関連研究と課題

本章では、DCの運用計画作成と、協調運用計画最適化に関する既存研究と、再エネ化を志向するDCを含む

1) Hitachi, LTD

協調運用計画最適化に向けた課題を説明する。

2.1 DC の運用計画作成

1 章で述べたように、DC の運用計画の調整手段として、サーバで実行される IT ワークロード (WL: Workload) の実行を時間的/空間的にシフトさせるものが知られている。WL は、モデルの学習処理等の実行を遅延させることが可能なバッチジョブと、Web サーバー等の遅延が許されないインタラクティブジョブに分類でき、特に時間的シフトについては、バッチジョブのみ制御が可能である。Liu らは、各タイムブロックにおけるバッチジョブの実行量を変数として最適化問題として定式化し、これを解くことで WL の実行計画を作成している [8]。このように、WL を制御対象として運用計画を作成する際には、その WL の種類や、遅延可能な時刻を必要とする。一方で、これらの情報はシステム管理者といった他事業者には提供できない可能性が高い。また、インタラクティブジョブの量によって各タイムブロックの消費電力の下限が決められるため、システム管理者からのトップダウン的に計画を指定するのは困難である。

また、DC 事業者は再エネ化を目的とする一方で、協調する DER 事業者等は利益を上げることのみが目的であると考えられる。そのため、事業者ごとの目的の違いを考慮し、その目的に応じて運用計画が作成される必要がある。

以上から、再エネ化を志向する DC 事業者を含む協調運用計画最適化の要件として、以下の 2 つが求められると考え、本研究では、これらの要件を満たした上で運用計画の作成を行う。

要件 1 WL 等の配下事業者の内部情報の秘匿し、運用計画作成の決定権を配下事業者が保持する

要件 2 事業者ごとの再エネ目標を含む目的の違いを考慮する

2.2 協調運用計画最適化

協調運用計画最適化は、コストの最小化といった全体の目的に最も効果的になるように、配下の DER の充放電といった制御対象の制御を決定するものである。Zamani らは、配下の蓄電池の充放電といった可能な制御を変数として、混合整数最適化問題として定式化している [7]。一方で、この方式においては、蓄電池の充電量や工場の稼働状況といった情報を管理者に提供する必要がある。このプライバシーの問題に対し、全体の最適化問題を管理者側、配下事業者側に分解し、交互に最適化問題を解き合うことで、配下の機器の詳細な情報を必要とすることなく全体最適な協調運用計画を作成する階層的最適化手法が提案されている。管理者側の変数を指令、配下事業者側の変数を制御とすると、簡易的には以下の形で定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \text{総コスト (制御, 指令)} \\ & \text{制御, 指令} && \\ & \text{subject to} && \text{制御} = g(\text{指令}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 g は以下の各配下事業者の指令下でのコスト最小化問題の最適解を結合したものである。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \text{コスト}_i(\text{制御}_i, \text{指令}) \\ & \text{制御}_i && \\ & \text{subject to} && \text{制御}_i \in (\text{可能な制御}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、可能な制御は、事業者が所持する機器によって定められ、蓄電池の各タイムブロックでの出力を例に取ると、最大放電量や最大蓄電量、現在の充電量から(不)等式に書き換えられる。

指令は、管理者、配下事業者の関係によって決まっており、各タイムブロックでの電力使用量や電力価格が扱われる。式 2 は、配下事業者によって求解され、その結果が管理者に送信される。管理者は配下事業者の指令に対する振る舞いを考慮して指令を決定する必要があるが、これにより管理者側が配下事業者の所持機器の詳細を必要とせず、全体最適な運用計画が求められる。この問題を解くためには、上記の問題を列制約生成法 [9]、ラグランジュの未定乗数法 [10] 等によって、管理者側、配下事業者側へと分解すること、あるいは総コストを指令に対するブラックボックス的な関数として扱い、遺伝的アルゴリズム [11]、粒子群最適化 (PSO) [12] といったメタヒューリスティック最適化手法を用いて、配下事業者の最適化結果を元に指令の更新繰り返しすることによって求められる。本研究においては、再エネ価格を指令とし、ヒューリスティックベースの階層的最適化を行う。

これらの階層的最適化により、要件 1 は達成される。一方で要件 2 の達成に向けては以下の 2 課題がある。

課題 1 各事業者が利用するエネルギーの種類 (再エネ/非再エネ) を区別しない

従来手法においては、各事業者が利用する消費電力量のみを扱い、利用するエネルギーの内訳 (再エネ/非再エネ) は考慮しない。よって、消費電力量を決定するプロセスと再エネの調達量を決定するプロセスが分離される。再エネの発電量は時間によって異なり、再エネ化を志向する事業者は、再エネの豊富な時間帯に消費電力量を増やすことで再エネ化が安価、容易に進められるため、再エネ化までを考慮した場合、最適な運用計画は異なるものになると考えられる。運用計画作成と同時に利用する再エネの量を決定することが望ましい。

課題 2 配下事業者がコスト最小化を目的とする単一なモデルで表現され、事業者ごとの再エネ目標を考慮しない

従来手法では、課題 1 により環境的な指標が算出できず、また、再エネ化にかかるコストを算出できない形になっており、事業者はコスト最小を目的として行動するものとして扱われる。また、コスト最小を前提として最適化問題の分解、変形が行われるものも多い。配下事業者毎に、再エネ化、利益追求といったように目的は異なると考えられるため、同様の設備を持つ事業者であっても再エネ化への思考によって最適な行動は異なる。そのため、これらの配下事業者ごとの目的の違いを最適化問題に組み込む必要がある。

以上を踏まえ、本研究においては、再エネ価格を指令としたヒューリスティックベースの階層的最適化を行うこと検討し、特に配下事業者側の最適化問題において、同時に再エネ利用量を計画し配下事業者の再エネ化に最適な運用計画を作成することで上記の課題を解決する。

3 提案手法

本章では、再エネ価格の階層的最適化による協調運用計画最適化手法を説明する。階層的最適化は図 1 の 4 ステップを繰り返すことで行われる。3.1 節で全体の流れを整理し、3.2 節で配下事業者における最適化問題について、3.3 節で管理者側の価格更新処理について述べる。

3.1 全体の流れ

まず、各事業者の目的について整理する。管理者は、全体として再エネ需給の過不足を削減することが目的であり、配下事業者との再エネ売上の価格(再エネ内部取引価格: $REprice$)を調整することでこれを達成する。配下事業者は、管理者から提示される再エネ内部取引価格のもとで、コスト、再エネ利用量から定まる指標を最大化することが目的であり、全体の需給バランスについては考慮せず、自身の運用計画を作成し、再エネ内部取引量を報告する。

階層的最適化は図 1 の 4 ステップで構成され、再エネ内部取引価格、配下事業者の運用計画の更新を繰り返すことでなされる。ステップ 1 において、管理者は各タイムブロックにおける再エネ内部取引価格を配下事業者に提示する。ステップ 2 において、配下事業者は提示された再エネ内部取引価格のもとで、再エネ内部取引量を含む運用計画を作成する。詳細は 3.2 節にて説明する。ステップ 3 において、配下事業者は自身の再エネ内部取引量のみを管理者に報告する。ステップ 4 において、管理者は配下事業者の再エネ内部取引量を収集し、その需給の不一致を解消するように再エネ内部取引価格を更新する。詳細は 3.3 節にて説明する。価格更新後、一定回数反復するまで、ステップ 1 に戻り、価格更新を繰り返す。

3.2 配下事業者の最適化問題

式 2 の定式化においては、配下事業者の再エネ利用を考慮せず、また、環境観点での指標を考慮しない。そのため、配下事業者 i の各タイムブロックでの再エネ利用量を $REuse_i$ として導入する。再エネ利用を計画することで、利用した再エネの量、再エネ率(総再エネ利用量/総消費電力)といった指標が計画時に求められる。これらの指標を配下事業者の各指標の優先度に応じた重み付け和として、配下事業者 i の目的を設計した。

$$\begin{aligned} \text{objective}_i(\text{制御}_i, REuse_i, REprice) \\ = k_{cost} * (\text{コスト}_i(\text{制御}_i) \\ REuse_i \cdot REprice) \\ + k_{REdiff} * \| \text{消費電力}_i * \text{目標 } RE \text{ 率} \\ - \sum_t (REuse_i)_t \| \\ - k_{REusage} * (\sum_t (REuse_i)_t) \\ + k_{norm} * \| REuse_i \| \end{aligned} \quad (3)$$

式 3 を用いて、配下事業者における最適化問題を以下のように定式化する。

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \text{objective}_i(\text{制御}_i, REuse_i, \\ & REprice) \\ \text{subject to} \quad & \text{制御}_i \in (\text{可能な制御}) \\ & REuse_i \leq \text{消費電力}_i \end{aligned} \quad (4)$$

配下事業者は、目標再エネ率等の情報と、所持する複数の機器情報、管理者モデルから提示される再エネ内部取引価格から、運用計画最適化問題を作成する。これを解くことで運用計画を作成し、再エネ内部取引量を管理者モデルに報告する。

3.2.1 DC 事業者における定式化例

ここでは、一例として、DC 事業者での定式化、特に式 4 における変数と制約を具体的に述べる。2.1 節で述べたように、制御対象はバッチジョブの実行時刻である。まず、各バッチジョブについて、実行可能時間帯 $[fr(\text{ジョブ開始時刻}), to(\text{ジョブ実行締切時刻})]$ ごとにまとめ、その総消費電力量を $BT_{fr,to}$ 、タイムブロック t において、実行可能時間帯が $[fr, to]$ であるバッチジョブに割り当てた消費電力量を $E_{fr,to,t}$ とする。ここでは、DC の運用計画を全バッチジョブが実行可能時間帯で実行されるという制約内で、式 3 が最大となるように $E_{fr,to,t}$ と $REuse_i$ を決定するものとした。タイムブロック t におけるインタラクティブジョブ量を IR_t 、タイムブロックにおける最大の消費電力を $maxW$ とすると、可能な制御は以下の制約によって表現され、以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \text{objective}_i \\ & E_{fr,to,t}, REuse_i \\ \text{subject to} \quad & \sum_{t=fr}^{to} E_{fr,to,t} = BT_{fr,to} \quad \forall fr, to \\ & IR_t + \sum_{fr, to} E_{fr,to,t} \leq maxW \quad \forall t \\ & (REuse_i)_t \leq IR_t + \sum_{fr, to} E_{fr,to,t} \quad \forall t \\ & 0 \leq REuse_i \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 管理者

管理者は、配下事業者クラスに再エネ内部取引価格を提示し、その応答として得られる再エネ内部取引量を元に、再エネ過不足が減少するように再エネ内部取引価格を更新する。簡単のため、配下事業者全体について、「再エネ内部取引価格 $REprice$ を入力として、各タイムブロックの再エネ内部取引量の総和 ($\sum_i REuse_i$) を出力する関数 g 」として扱う。管理者の目的は、この関数 g のノルムを最小化させる $REprice$ を探索することである。こうした最適化の一つの手法として、関数 g の勾配を用いるものがある。しかし、関数 g は配下事業者の運用計画最適化の最適化を用いて計算されるものであるため、勾配を直接取得することはできない。また、蓄電池等においては、再エネ内部取引価格の価格差が充放電による損失を下回る場合は充放電せず、上回ると急激に充放電を行うという極端な動きをするため、数値微分等

で勾配を近似しても役に立たない場合が多い。そこで、「時刻 x の再エネ内部取引価格 ($REprice$) $_x$ が増加/減少すると、時刻 x の再エネ内部取引量 (g) $_x$ は減少/増加 (少なくとも非増加/非減少) する」という仮定のもと、勾配の代わりに再エネ過不足量を用いて再エネ内部取引価格を再エネ内部取引価格が正の範囲で学習させる。具体的な手順を Algorithm1 に示す。

Algorithm 1 update $REprice$

Require: 更新回数 T 初期学習率 α_0 、終了時学習率 α_T 、初期再エネ内部取引価格 p_0

$\alpha \leftarrow \alpha_0$

$k \leftarrow (\alpha_T / \alpha_0)^{(1/T)}$

for $t = 0$ to T **do**

$REprice \leftarrow \max(0, REprice + \alpha * g(REprice) / \max(g(REprice)))$

$\alpha \leftarrow \alpha * k$

end for

4 実験結果

4.1 実験設計

DC 事業者の再エネ化を目的とした導入を想定し、配下事業者として、DC 事業者*3、発電事業者*1、蓄電池所持事業者*1 の構成で、30 分単位 1 日分の再エネ需給調整計画を作成する。以下、各事業者の目的と所持機器について述べる。また、簡単のため、再エネ化にかかるコストのみを考慮する。

DC 事業者は、自身の再エネ目標を安価に達成することを目的とする。再エネ目標を 70% に設定し、コスト、再エネ率ともに重視することを意図して $k_{cost} = 1, k_{REdiff} = 1, k_{REusage} = 1, k_{norm} = 1$ とした。次に機器情報 (WL 情報) として、30 分おきにそれぞれ 2MWh/1MWh/0.2MWh の WL を 8 割をインタラクティブジョブ、2 割を最大 12 時間遅延できるバッチジョブとして発生させる。

次に、発電事業者は、発電した電力を売却する。制御対象はないため、指令によらず、発電した電力を全て売却する。TEPCO の発電データの PV 発電と風力発電のデータについて、通年での総発電量が、通年での総要求再エネ量 (各 DC 事業者についての (総消費電力*目標再エネ率) の総和) に等しくなるようにスケールさせた。図 3 に示されるように、PV 発電が主力であり、昼間に電力の大半を発電し、夜間の発電量は微小である。

最後に、蓄電池事業者は、蓄電池の充放電により、再エネ内部取引価格の価格差による利益をあげることを目的とする。コストのみを重視することを意図して $k_{cost} = 1, k_{REdiff} = 0, k_{REusage} = 0, k_{norm} = 1$ とした。蓄電池の規模としてメガソーラーへの蓄電池の併設事例 (https://www.sbenergy.co.jp/ja/news/press/2020/0701_110000.html) を元に発電事業者に合わせて発電事業者の最大出力を 20 分程度賄える規模にスケールさせることで蓄電池スペック、蓄電池量を決定し、最大放電量 $2.4 * 10^4 [kw]$ 、最大蓄電量 $6.7 * 10^3 [kwh]$ 、充放電時損失を 0.9 とした。

再エネ価格の最適化は更新回数 300、初期学習率は 1、終了時学習率 0.00001、初期再エネ内部取引価格は全タイムブロックで 5 円とした。

提案手法の有効性を確認するため、(2019/12/1 ~ 2020/12/1) のデータを用いて比較実験を行った。比較対象として、再エネ過不足削減量の理想形として管理者が全情報を収集、制御を決定するもの (以下、管理者制御)、配下事業者の目的達成支援、再エネ過不足削減のベースラインとして、各事業者が独自に再エネを調達、運用計画の作成を行うもの (以下、非協調) を扱う。管理者制御においては、配下事業者の目的を考慮せず、再エネ過不足の削減のみを目的として可能な制御の中から制御を最適化させた。非協調においては、発電した電力を各 DC 事業者に消費電力に比して分配した量まで $0.3 [¥/kWh]$ で調達可能とし、上記の目的を元に運用計画を作成させた。

4.2 結果と考察

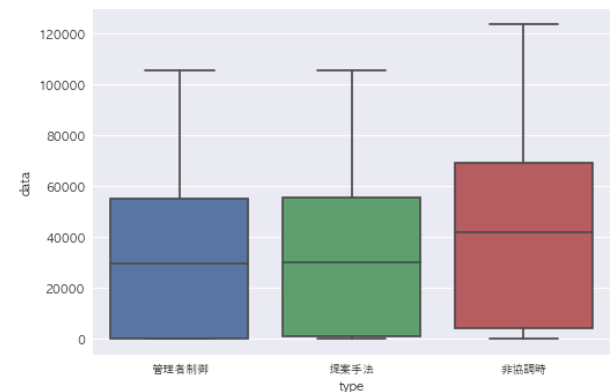


図 2 非協調時、提案手法と管理者制御における年間を通じた再エネ過不足量

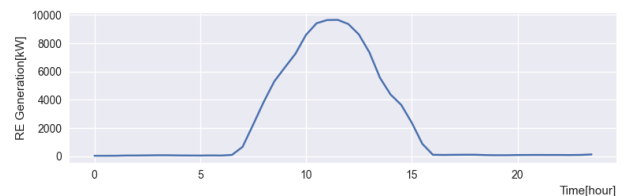


図 3 発電事業者の発電量

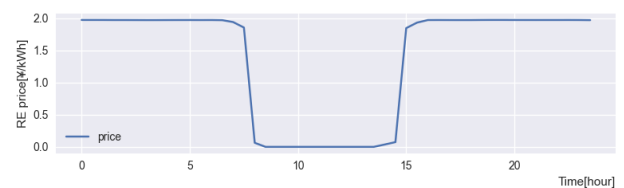


図 4 提案手法における再エネ内部取引価格

図 2 に管理者制御、提案手法、非協調についての再エネ過不足量を示す。年間を通じた平均再エネ過不足量は、それぞれ $3.269 * 10^4 [kWh]$ (管理者制御)、 $3.291 * 10^4 [kWh]$ (提案手法)、 $4.213 * 10^4 [kWh]$ (非協調) であり、提案手法が非協調時に比べ、22% の削減が行われていること、管理者制御に比べても 1% 以下の増加とほぼ同一の過不足量が達成できていることが確認できる。

また、表 4.2 に提案手法、非協調、管理者制御についての年間での平均再エネ率、平均コストを示す。

	再エネ率 [%]		コスト [¥]	
	非協調時	提案手法	非協調時	提案手法
DC 事業者 0	42.57	48.03	12260	34097
DC 事業者 1	42.57	47.96	6130	16988
DC 事業者 2	42.57	49.12	1226	3544
蓄電池事業者	-	-	0	-16167
発電事業者	-	-	-32256	-38475

表1 非協調時と提案手法における各事業者の再エネ率とコスト

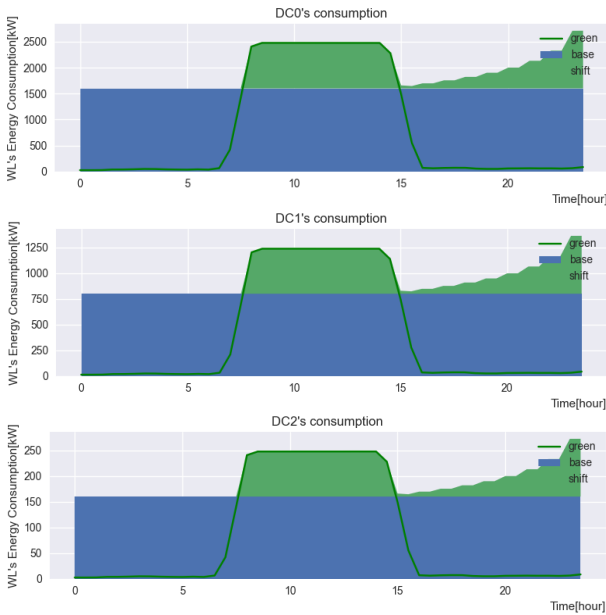


図5 非協調時のDC0(上)/DC1(中)/DC2(下)の消費電力と再エネ利用量。青い領域がインタラクティブジョブによる消費電力、緑の領域がバッチジョブによる消費電力、緑の線が再エネ利用量を示す。

DC 事業者 1,2,3 について、コストがそれぞれ 12260 ¥ → 34097 ¥、6130 ¥ → 16988 ¥、1226 ¥ → 3544 ¥ と増加しているが、目的である再エネ率については、それぞれ 42.57% → 48.03%、42.57% → 47.96%、42.57% → 49.12% と向上が確認できた。また、蓄電池事業者については、利益をあげていることが確認できた。蓄電池所持事業者は、蓄電池の充放電によって DC 事業者 0,1,2 の支払ったコストの一部を受けとり利益を上げており、各事業者のコスト減、再エネ化といった目的達成の支援が可能であることが確認できた。

次に、それぞれの目的達成に寄与した協調的行動について、2019/12/1 の非協調時と提案手法における運用計画の違いから述べる。2019/12/1 における発電量は図3の通りで、価格最適化の結果、図4のように、再エネ価格は昼間は安価、夜間は高価になっている。

まず、DC 事業者について、非協調時の運用計画を図5に、提案手法における運用計画を図6に示す。まず、いずれの場合においても、夜間の消費を抑え、昼間の消費を増加させ再エネを利用していることが見てとれ、再エネ化を志向する DC 事業者は、全体の再エネ過不足削減に寄与することが確認できる。また、協調時においては、夜間にも高価ではあるが一定量の再エネを利用し、再エネ率を向上させていることが確認できる。これにより、蓄電池事業者に昼間から夜間へ充放電による電力

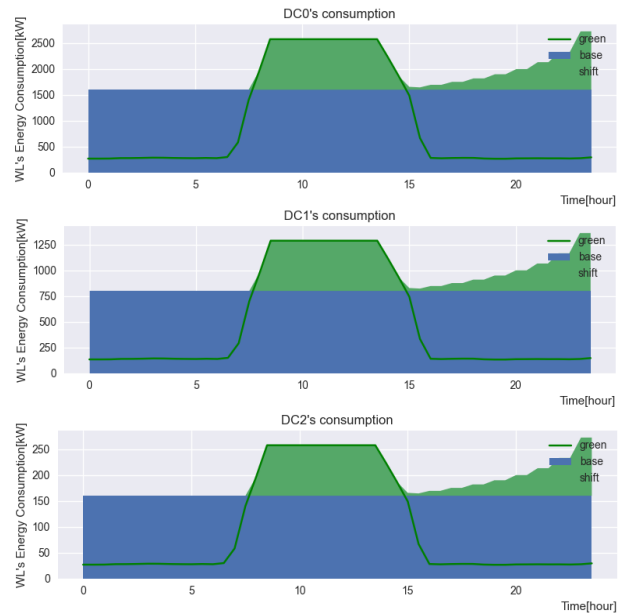


図6 提案手法におけるDC0(上)/DC1(中)/DC2(下)の消費電力と再エネ利用量。青い領域がインタラクティブジョブによる消費電力、緑の領域がバッチジョブによる消費電力、緑の線が再エネ利用量を示す。

のシフトを行うインセンティブを与えていると考察できる。

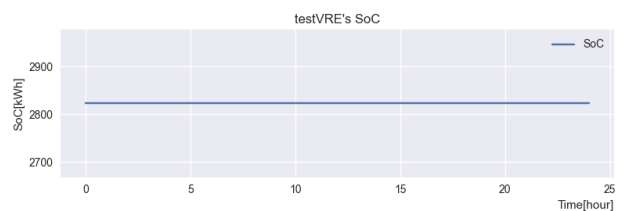


図7 非協調時の蓄電池の蓄電量の推移

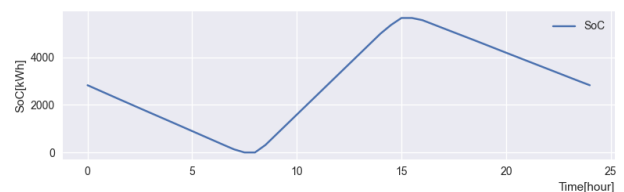


図8 提案手法における蓄電池の蓄電量の推移

次に、蓄電池事業者について、非協調時の運用計画を図7に、提案手法における運用計画を図8に示す。再エネ内部取引価格の価格差に基づき、元々は充放電をしなかったものが、再エネが安価な昼間に充電、再エネが高

価な夜間に放電という行動をとっていることがわかる。これにより、再エネが飽和していた昼間から再エネ枯渇する夜間へと再エネの供給をずらすことで全体の再エネ過不足減少に寄与し、同時に自身が目的とする利益を上げることを達成している。一方で、蓄電池の充放電には損失が生じるため、この行動を取るにはこの損失を上回る価格差が必要であることには注意が必要である。価格最適化の結果、図 4 のように価格差が発生し、この協調的行動をとっていることが確認できる。

これらの傾向をまとめると、全事業者が、再エネ内部取引価格から昼間の消費を増やすべき時間帯に消費を増やし、夜間に消費を減らす、あるいは供給を生み出すことにより、再エネ過不足の削減に寄与し、コスト志向の強い事業者から環境志向の強い事業者へと両者が納得する再エネ内部取引価格で再エネが融通されることでそれぞれの目的の達成を支援していると考察できる。

5 まとめと今後の課題

本研究では、再エネ化を志向する DC を含む協調運用実現に向け、要件 1、2 を満たした上での協調運用計画最適化を可能にすることを目的とした。要件 1 のため、階層的最適化手法に注目し、要件 2 の達成に向けた従来技術での課題 1、2 の解決を目的として、階層的最適化における配下事業者の運用計画最適化問題において、再エネ利用を運用計画と同時に計画し、各事業者の再エネ化を含む目的に応じた指標を最大化する手法を提案した。DC 事業者*3、蓄電池所持事業者、PV 発電事業者の構成で、提案手法/非協調時/管理者による制御と 3 つの運用計画作成方式について、比較実験を行い、再エネ過不足が非協調時に比べ 22%削減できること、再エネ過不足削減のみを目的とした運用計画と近い過不足量を達成できること、各事業者の利益追求、再エネ化といった目的を支援できることを確認した。

本研究により再エネ化を志向する DC を含む協調運用により再エネ過不足を削減可能である見通しを得た。一方で、これらの評価は計画時のものであり、計画を実行する際には再エネの予測発電量と実発電量の誤差が発生する。そのため、この予測誤差に対応するため、計画とのずれをトリガーとして再計画するといった予実差に対応する方式を検討することが今後の課題である。

参考文献

- [1] 国. 低炭素社会戦略センター, “データセンター消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題,” *情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響*, vol. 2, 2021.
- [2] AmazonWebServices, “Sustainability in the cloud(<https://sustainability.aboutamazon.com/environment/the-cloud?energytype=true>),”
- [3] Google, “Environmental report(<https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2021-environmental-report.pdf>),” 2021.
- [4] Microsoft, “Sustainability from the datacenter to the cloud with azure(<https://www.microsoft.com/en-us/sustainability/azure>),”
- [5] J. Luo, L. Rao, and X. Liu, “Spatio-temporal load balancing for energy cost optimization in distributed internet data centers,” *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 3, no. 3, pp. 387–397, 2015.
- [6] R. M. Institute, “The dutch wind consortium,” 2017.
- [7] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, “Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant,” *Applied Energy*, vol. 169, pp. 324–340, 2016.
- [8] Z. Liu, Y. Chen, C. Bash, A. Wierman, D. Gmach, Z. Wang,

M. Marwah, and C. Hyser, “Renewable and cooling aware workload management for sustainable data centers,” *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, vol. 40, pp. 175–186, June 2012.

- [9] S. Yin, Q. Ai, Z. Li, Y. Zhang, and T. Lu, “Energy management for aggregate prosumers in a virtual power plant: A robust stackelberg game approach,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, p. 105605, 2020.
- [10] P. Samadi, A.-H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V. W. S. Wong, and J. Jatskevich, “Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid,” in *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 415–420, Oct 2010.
- [11] G. Yuan, Y. Gao, B. Ye, and Z. Liu, “A bilevel programming approach for real-time pricing strategy of smart grid considering multi-microgrids connection,” *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 7, pp. 10572–10589, 2021.
- [12] G. Yuan, Y. Gao, B. Ye, and R. Huang, “Real-time pricing for smart grid with multi-energy microgrids and uncertain loads: a bilevel programming method,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 123, p. 106206, 2020.