

協調型エネルギーマネジメントによる分散型蓄電池制御のための インセンティブモデルの検討

鈴木 達哉[†] 川嶋 宏彰[†] 加藤 丈和[†] Rodrigo Verschae[†] 松山 隆司[†]

Tatsuya Suzuki Hiroaki Kawashima Takekazu Kato Rodrigo Verschae Takashi Matsuyama

1. はじめに

電力ネットワークの安定運用のためには、電力ネットワーク全体の電力消費(需要)と発電(供給)をリアルタイムで一致させる需給バランス維持が重要である。従来の電力ネットワークでは、電力会社が需要の変動に応じて発電を制御することで需給バランス維持を行ってきたが、発生頻度が稀な需要ピーク時に合わせた発電設備が必要となるため、多大な設備投資が要求されるという問題がある。また近年では、太陽光発電をはじめとする自然エネルギーの導入によって、発電側にも制御不可能な変動要因が増加し需給バランス維持がより難しくなるという問題も発生している。

このような問題に対して、デマンドレスポンス(DR)[1][2]と呼ばれる、需給バランス維持のために、電力の需要を制御する取り組みが始まっている。DRには、電力系統運用者から電力需要の大きさに応じて時間帯によって異なる電気料金(Time of Use: TOU)を提示して、各需要家に電力需要の平坦化を促す方法や、電力需要が極めて大きい時間に需要家にインセンティブやペナルティを与えて使用抑制を行う方法(Critical Peak Pricing: CPP)などが提案されている。しかし、これらの方法は、系統運用者から一方的に需要抑制のための信号を送り、各需要家が個別の判断で需要抑制を行うというトップダウン型で行うため、ある程度のピーク需要抑制効果は期待できるが、必要以上に需要が下がりすぎたり、リバウンドピークが発生するなどの問題があり、需要パターンを制御する手法としては不十分である。

また、系統運用者が需要家の電気機器の使用抑制や、太陽光発電などの変動電源の出力抑制の信号を直接送るなど直接制御(Direct Load Control)手法も提案されているが、需要家の機器に直接的に介入されるため受け入れられにくい、自然エネルギーの電力を有効活用しきれないなどの問題もある。

このような問題に対して我々の研究グループでは、個々の需要家が主体的に需給バランス調整に参加し、需要家同士の協調連携によって需給バランス維持を達成する協調型エネルギーマネジメントの枠組みを提案している[3][4]。この枠組みでは個々の需要家が自分自身の電力需給の計画、管理能力を持ち、複数の需要家がまとまってグループを形成して互いに協力することで、グループ全体として大きな需要制御能力を達成する手法である。需要家間の協調連携によって需要制御を行うことで、オーバーシュートやリバウンドピークを発生させることなく、より効果的かつ確実な需要制御を実現できる。

本稿では、協調型エネルギーマネジメントの枠組み

による分散蓄電池制御について検討する。個々の需要家が蓄電池を持ちそれを需要家群で連携制御することにより、各需要家が独立に蓄電池を利用する場合と比べて需要家群全体でより大きなピーク削減効果、電力コスト削減効果を達成する方法を示し、またグループ全体のメリットを各需要家に還元するためのグループ内インセンティブモデルの設計、検証を行う。

2. 協調型エネルギーマネジメントによる需給計画の分散最適化

2.1. 基本的な枠組み

我々が提案する協調型エネルギーマネジメントでは、需要家グループの調整役としてコーディネータの存在を仮定し、各需要家は電力管理システム(需要家EMS)を持ち、コーディネータを経由して他需要家と連携する。需要家EMSは前日までに需要家ごとの一日の需給計画を立て、それを需要家間で調整し、当日には調整された計画に従って需要家ごとの電力を使用、制御するものとする。本稿では、特に事前の需給計画の調整に注目する。

ここで、需要家 $i \in \mathcal{N}$ の電力使用計画プロファイル(以下では単に電力使用プロファイルまたはプロファイルと呼ぶ)を $x_i \in R^T$ とする。 $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ は需要家の集合、 N は需要家数、 T は一日のタイムスロット数であり、例えば一日を15分刻みで考えた場合は $T = 96$ となる。

各需要家は、電力使用プロファイルに対する不満足度の指標である目的関数 $f_i(x_i)$ を持っている。これは生活者の生活パターンにおいて電力をどのように使用したいか、あるいは電気料金に対するコスト意識によって需要家ごとに定められる。一方で、コーディネータはグループ全体の電力需要に対する目的関数 $g(\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i)$ を持ち市場からの電力調達コストなどを反映する。

協調型エネルギーマネジメントの問題は、需要家とコーディネータの両方の目的関数を最小にする電力使用プロファイル x_i を決める問題として次式のように定式化できる。

$$\min_{x_i} g\left(\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i\right) + \sum_{i \in \mathcal{N}} f_i(x_i) \quad (2.1)$$

これをそのまま最適化問題として解こうとすると、全ての需要家の目的関数 $f_i(x_i)$ を知っている必要があるが、 $f_i(x_i)$ は需要家ごとに様々で、日々の条件により変化するため事前に共有するのは現実的ではない。また、需要家の好みや嗜好を反映した情報でありプライバシー保護の観点からも隠蔽したい情報である。

そこで、文献[4]では目的関数 $f_i(x_i)$ を共有せず、各需要家が自分自身の目的関数 $f_i(x_i)$ に従って電力使用

[†]京都大学大学院情報学研究所

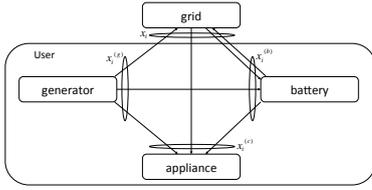


図 2.1: 需要家の電力フロー

プロファイルを作成し、それらをコーディネータと交渉しながらすり合わせることで、式 (2.1) を最適化する電力使用プロファイルを協調的に定める方法を提案した。

2.2. 需要家モデル

本節では、本稿で扱う需要家のモデルについてまとめる。図 2.1 に示すように、電力消費機器 (家電)、発電機 (太陽光発電, コージェネ, 燃料電池など)、蓄電池を持つものとする。ここで、 $x_i^{(c)}$ を電力消費機器の電力消費プロファイル, $x_i^{(g)}$ を発電機の発電電力プロファイル, $x_i^{(b)}$ を蓄電池の充放電プロファイル (ただし $x_i^{(b)} > 0$ のとき充電を表す) とすると需要家全体の電力消費プロファイル x_i は以下のように求められる。

$$x_i = x_i^{(c)} + x_i^{(b)} - x_i^{(g)} \quad (2.2)$$

これは、需要家が外部から購入, 売却した電力のプロファイルとなっている。このとき需要家の目的関数 $f_i(x_i)$ は以下のように分割して考えられる。

- $f_i^{(c)}(x_i^{(c)})$ 電気機器の使用パターンを変えて電力消費プロファイル $x_i^{(c)}$ を実現する困難さや QoL を表す関数
- $f_i^{(g)}(x_i^{(g)})$ 発電機の発電電力プロファイル $x_i^{(g)}$ の実現にかかる発電コストや制約を表す関数
- $f_i^{(b)}(x_i^{(b)})$ 蓄電池の好ましい使い方や制約条件などを表す関数
- $f_i^*(x_i)$ 需要家と外部との電力の授受に対する制約などを表す関数

これらの総和が需要家の目的関数 $f_i(x_i) = f_i^{(c)}(x_i^{(c)}) + f_i^{(g)}(x_i^{(g)}) + f_i^{(b)}(x_i^{(b)}) + f_i^*(x_i)$ となる。

本稿では、簡単のため需要家は発電設備を持たず、また調停によって電力消費プロファイルを変更しないものとし、あらかじめ需要家ごとに決めた電力消費プロファイルに対して蓄電池の充放電プロファイル $x_i^{(b)}$ のみを制御変数として最適化を行うものとする。このとき、目的関数は $f_i(x_i) = f_i^{(b)}(x_i^{(b)})$ とする。

蓄電池制御モデル 需要家 i が持つ蓄電池のあるタイムスロット t における充電レベルを $c_{i,t}$ [kWh] とする。簡単のために充電レベルの変化は蓄電池の入出力 $x_{i,t}^{(b)}$ [kW]

に関する一次関数であると仮定すると、以下の式で表される。

$$c_{i,t} = c_{i,t-1} + x_{i,t}^{(b)} \Delta t \quad (2.3)$$

ここで Δt [h] はタイムスロット間隔を表す。実際には内部抵抗などによって損失が生じるのでそれを考慮に入れる必要があるが、本研究では簡単のために損失がないものとする。ここで、蓄電池の最大容量を C_{max} [kWh] とすると、緊急時に備えて通常時はその 10% から 90% の範囲で蓄電池を使用するものとする。それに加えて、蓄電池には最大入力電力値 X_{Imax} [kW], 最大出力電力値 X_{Omax} [kW] が定められており、それらの範囲内で蓄電池を使用する必要がある。

これらの条件を $f_i^{(b)}(x_i^{(b)})$ に導入して最適化を行う際には充電レベル $c_{i,t}$ か電力値 $x_{i,t}^{(b)}$ のどちらかに統一して定式化をする必要があるため、本研究では電力値 $x_{i,t}^{(b)}$ に統一することとした。このとき、タイムスロット t における充電レベルは $c_{i,t} = c_{i,0} + (\sum_{t=1}^t x_{i,t}^{(b)}) \Delta t$ と表されるので制約式は $x_i^{(b)}$ を用いて以下のように表すことができる。

$$0.1C_{max} \mathbf{1}_T \leq \mathbf{L}x_i^{(b)} + c_{i,0} \mathbf{1}_T \leq 0.9C_{max} \mathbf{1}_T \quad (2.4)$$

$$-X_{Imax} \mathbf{1}_T \leq x_i^{(b)} \leq X_{Omax} \mathbf{1}_T \quad (2.5)$$

$$c_{i,T} = \Delta t (\mathbf{1}_T \cdot x_i^{(b)}) + c_{i,0} = 0.5C_{max} \quad (2.6)$$

ただし

$$\mathbf{L} := \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & \cdots & 0 \\ \Delta t & \Delta t & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ \Delta t & \Delta t & \cdots & \Delta t \end{bmatrix} \in R^{T \times T} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{1}_T := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \in R^T \quad (2.8)$$

ここで、 $c_{i,0}$ は充電レベルの初期値, $c_{i,T}$ は一日の終わりでの充電レベルを表す。式 (2.4) は充電レベルに関する制約式, 式 (2.5) は蓄電池の入出力に関する制約式, 式 (2.6) は一日の境界条件の例として一日の終わりに充電レベルが 50% となるものである。ただし、式 (2.4) および式 (2.5) の不等号はベクトルの要素ごとの大小関係を表す。これらの制約条件をもとにして各需要家では最適化を行い電力プロファイル x_i を決定する。最適化を行う関数 $f_i^{(b)}(x_i^{(b)})$ として本稿では、当日の運用時の予想外の消費電力変動に対応するため、充電容量をできるだけ最大容量の 50% に保つように以下の目的関数を用いた。

$$f_i^{(b)}(x_i^{(b)}) = \|\mathbf{L}x_i^{(b)} + c_{i,0} \mathbf{1}_T - 0.5C_{max} \mathbf{1}_T\|^2 \quad (2.9)$$

2.3. 協調的プロファイル作成アルゴリズム

2.1 節で述べたように、協調型エネルギーマネジメントでは各需要家とコーディネータの交渉によるすり合

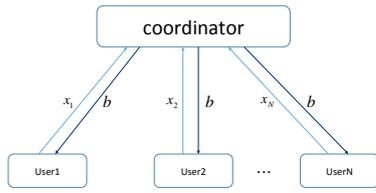


図 2.2: 分散最適化の手順の模式図

わせによって電力使用プロファイルを決定する。このとき、各需要家の目的関数 $f_i(x_i)$ は共有せずにプロファイル x_i の要求、修正のみですり合わせを実施する。

具体的には、式 (2.1) を双対分解と ADMM と呼ばれるアルゴリズム [5] によって、次式のように需要家側とコーディネータ側の二つの最適化問題に分割して、双方の最適化の繰り返し計算によって全体を最適化する。

$$x_i^{(k+1)} = \underset{x_i}{\operatorname{argmin}} f_i(x_i) + \frac{\rho}{2} \|x_i - x_i^{(k)} + b^{(k)}\|^2 \quad (2.10)$$

$$\bar{z}^{(k+1)} = \underset{\bar{z}}{\operatorname{argmin}} g(N\bar{z}) + \frac{N\rho}{2} \|\bar{z} - \bar{x}^{(k+1)} - \eta^{(k)}\|^2 \quad (2.11)$$

$$\eta^{(k+1)} = \eta^{(k)} + \bar{x}^{(k+1)} - \bar{z}^{(k+1)} \quad (2.12)$$

$$b^{(k+1)} = \bar{x}^{(k+1)} - \bar{z}^{(k+1)} + \eta^{(k+1)} \quad (2.13)$$

ただし、 \bar{x} 、 \bar{z} をそれぞれ x_i 、 z_i の平均を表すものとする。つまり x_i は各需要家が個別に算出した最適なプロファイル、 z_i はコーディネータが算出した最適な需要家のプロファイルであり、繰り返し計算によって x_i と z_i が近づくように妥協点を探っていくことで全体の最適解を探索する。このとき、 b は全体を最適化するために各需要家にプロファイルの変更を指示するブロードキャスト信号とする。

このアルゴリズムの流れは次のようになる。まず、各需要家は個別に $f_i(x_i)$ を最小化するようなプロファイル $x_i^{(k)}$ を作成してコーディネータに送信する。コーディネータは集まったプロファイル $x_i^{(k)}$ をもとにして \bar{z} の最適化 (式 (2.11)) を行い、式 (2.12)、(2.13) より計算したブロードキャスト信号 b を各需要家に知らせる。各需要家は b を受け取るとそれを反映して x_i の更新 (再最適化) を式 (2.10) により行い、それをコーディネータに送信する。これらのやりとりを反復的に繰り返すことによって、各需要家とコーディネータ間における妥協点を分散的に探す (図 2.2)。

このとき、コーディネータから需要家に送信されるブロードキャスト信号 b は、各需要家から要求する最適プロファイル x_i の総和と、コーディネータで算出した全体の最適プロファイル \bar{z} との差に基づいて算出されており、コーディネータが計画を修正したい時間帯を表す計画修正依頼のプロファイルに相当する。

3. 協調型エネルギー管理のためのコストモデル設計

3.1. コストモデル設計の目的

協調型エネルギー管理の目的は、需要家同士の連携によって電力調達コストの最小化などグループ全体でメリットを得て、またそれを各需要家に還元することである。具体的にはグループ内で協調したことで得られるコーディネータの調達コスト削減分を各需要家に配分することで、需要家に還元する。そのために本研究では、グループ全体の電力調達コストとは別に、グループ内で利益を配分するためのグループ内コストモデルを設計する。グループ内コストモデルを設計するにあたって、次の2点が重要となる。

- 需要家同士が協調しないときより、協調したほうがより大きなメリットを享受できること
- 協調した場合にグループ全体の目的に貢献した需要家が貢献していない需要家よりも大きなメリットを享受できること

前者は、協調型エネルギー管理の目的そのものでもあり、DR のようにトップダウンの価格信号のみを参照して需要家が個別に最適化するより、協調によってグループ全体の目的を達成でき、それが需要家にも還元されることで、グループに参加するインセンティブにもつながる。また、後者は需要家間の公平性を表しており、これにより全体の目的に貢献するために生活パターンを変える、容量の大きな蓄電池を購入するなどの各需要家の貢献へのインセンティブにつながる。

3.2. グループ全体の電力調達コストのモデル

コーディネータがグループ全体の電力を調達する方法には市場調達や相対取引などいくつか想定される [6][7]。本稿では特にコーディネータが電力系統から一括受電をする場合を想定し、一括受電で一般的な使用電力にかかる電力量料金 (従量コストとよぶ) と需要ピークにかかる基本料金 (ピークコストと呼ぶ) の二段階料金制度を適用する。また、電力量料金については、昼間が高く夜間が安い時間帯別料金を適用する。

時間帯別料金に対して各需要家が個別最適化を行うと、いずれの需要家も夜間に電力使用をシフトすることで夜間のピーク値が大きくなるというリバウンドピークの問題が起きる。このような問題を協調型エネルギー管理によって回避できることを検証する。

なお、一般的に基本料金は過去一年間の電力使用のピーク値によって決まるが、本稿では簡単のため一日のピークによって決まるものとし、グループ全体の電力調達コスト cost_c を以下のように定義する。

$$\text{cost}_c = p \cdot \sum_{i \in N} x_i + p_b \left\{ \sum_{i \in N} x_i \right\}_{\max} \quad (3.1)$$

ただし、 $\{X\}_{\max}$ はベクトル X の要素の最大値、 $p \in R^T$ は時間帯別の電力量料金の単価、 $p_b \in R$ は基本料金の単価を表す。このとき第1項は各時間帯ごとの電力量料金の一日の総和であり、記号 \cdot は内積を表す。第2項はピーク電力によって決まる基本料金である。

各需要家が支払うコストとしては、使用した電力量に対する電力量料金や基本料金の各需要家への配分が考えられる。本研究では、最終的に各需要家が支払う電気料金は、グループ全体の調達コストにコーディネータが得る利益を加えたものを、各需要家へ分配したものととして設計する。このとき各需要家への分配は、調達する際の時間帯別電力量料金だけでなく、各需要家がグループ全体のコスト削減にどれくらい貢献しているかを考慮して設計する。

3.3. グループ内コストモデル

ここでは、グループ内のコストモデルについて検討する。グループ内のコストも電力量に応じて支払う従量コストとピーク電力に対して支払うピークコストの二段階で設計する。ここで $q \in R^T$ を、タイムスロット $t=1, \dots, T$ の電力量単価 q_t を並べてベクトルとしたもの、 $q'(x_i)$ を電力プロファイル x_i に対して支払うピークコストとすると、需要家 i が支払う電力料金は次式のように与えられる。

$$\text{cost}(x_i) = q \cdot x_i + q'(x_i) \quad (3.2)$$

3.3.1. 従量コストの設計

使用した電力量に応じてかかる従量コストは、公平性により需要家間で共通した電力量単価を使用すべきである。つまり、グループ全体で支払う電力量料金を各需要家の電力使用量に応じて配分することになる。ただし、協調により調達コストが高い時間帯の電力使用を抑制し、ピークを各需要家で分散するなどを行うことで全体の調達コストが削減されるため、全体のコスト削減への貢献を反映して決定する必要がある。

本稿では2.3節で述べた分散最適化のブロードキャスト信号 $b \in R^T$ に応じた重みづけを行う。これはブロードキャスト b がグループの目的関数と需要家の目的関数とのすり合わせに用いるものであり、 b を通じて各需要家は、グループ全体の目的達成に関する情報(どの時間帯で目的達成が不十分であり、どのような計画修正が必要か)を、共通して受け取ることができるからである。

具体的な分配の方法としては次式のように従量コスト q を定義する。

$$q := \frac{p \cdot \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i}{b \cdot \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i} b \quad (3.3)$$

3.3.2. ピークコストの設計

従量コストではグループ全体の電力量料金の各需要家への配分方法を決定したが、ここではグループ全体の基本料金の配分について検討する。本研究では、需要家ごとの電力プロファイルに応じて、以下の3種類のピークコストを検討する。

1. 需要家等分方式 (計算法1) グループ全体の基本料金を各需要家で均等に等分する方式。この場合、

各需要家の電力使用プロファイルの違いに関わらず同じ基本料金を支払うことになる。

$$\text{cost}(x_i) = q \cdot x_i + \frac{p_{base}}{N} \left\{ \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i \right\}_{\max} \quad (3.4)$$

2. グループピーク分配方式 (計算法2) 基本料金を決めるグループ全体の電力使用ピークに対する各需要家の責任を反映するため、グループ全体のピーク時間帯における、各需要家の使用電力量に比例して分配する方式。

$$\text{cost}(x_i) = q \cdot x_i + p_{base} x_{i, t_{peak}} \quad (3.5)$$

ただし、 $t_{peak} := \text{argmax}_t (\sum_{i \in \mathcal{N}} x_{i,t})$ である。

3. 需要家ピーク分配方式 (計算法3) 各需要家がピークを削減するように、需要家ごとの電力使用ピークの大きさに比例して分配する方式。

$$\text{cost}(x_i) = q \cdot x_i + \frac{p_{base} \left\{ \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i \right\}_{\max}}{\sum_{i \in \mathcal{N}} \{x_i\}_{\max}} \{x_i\}_{\max} \quad (3.6)$$

4. 完全従量方式 (計算法4) グループ全体の電力コストをピークにかかる基本料金との区別なく、すべて使用電力量に応じた従量料金として各ユーザに配分する方式。

$$\text{cost}(x_i) = \frac{\text{cost}_c}{b \cdot \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i} b \cdot x_i \quad (3.7)$$

4. 実験結果

本章では、協調型エネルギーマネジメントによる蓄電池制御の有効性と、コストモデルによる需要家インセンティブの公平性について、シミュレーション実験の結果により検証する。

4.1. シミュレーション環境

需要家の電力消費プロファイル $x_i^{(c)}$ として、日本建築学会・住宅内のエネルギー消費量に関する調査研究委員会・住宅におけるエネルギー消費量データベース内の関西地区の2003年8月11日のものを用いた [8]。この中から5つの需要家を選んでそれを対象需要家グループとした(図4.1)。このグループは、User1とUser2が給湯器を持ち、深夜(4時前後)に大きな電力を使用して全体のピークを生成している。

グループ全体の電力調達コストは、グループ一括受電を想定し、関西電力の料金プランの一つである高圧電力AS-TOUの、ピーク電力によって決まる基本料金と、昼間、夜間の2段階の時間帯別電力量料金を用いた(表1)(2015年2月時点)。また、グループ全体の目的関数は全体の調達コストを安くするように、ピーク電力と時間帯別料金を考慮して次式を用いた。

$$g \left(\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i \right) = \left\| \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i \right\|^2 + p \cdot \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i \quad (4.1)$$

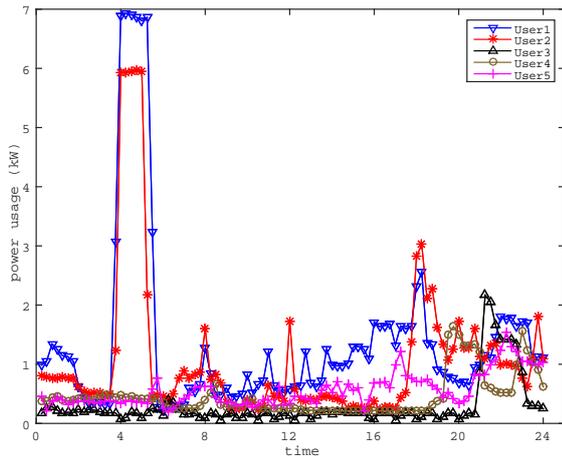


図 4.1: 各需要家の電力消費プロフィール

表 1: シミュレーションで用いた電力料金表

今回の設定		
基本料金 (p_{base})		57.78 円/kW・日
電力量料金 (p_t)	8:00-22:00	3.8475 円/kW・15min.
	上記以外	2.7775 円/kW・15min.

また、提案手法の有効性を確かめるため、各需要家が協調せず個別に電気料金の最小化を行った場合(個別最適化)と比較した。個別最適化では、需要家ごとに式(4.2)に示すように電力量コストとピークコストに従った電気料金を支払うものとし、電気料金が最小となるように蓄電池の充放電を行うものとする。

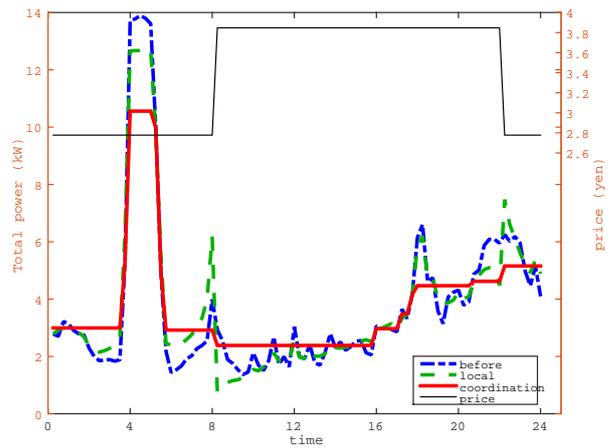
$$f_i(x_i) = p \cdot x_i + p_{base}\{x_i\}_{max} \quad (4.2)$$

4.2. グループとしての協調の効果の検証

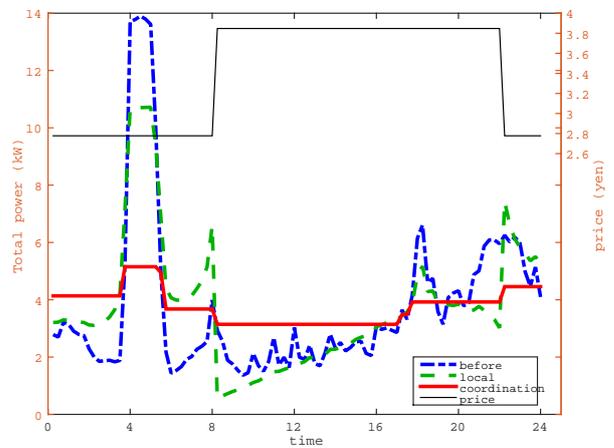
各需要家が1kWhの蓄電池を持っている場合、3kWhの蓄電池を持っている場合のグループ全体の電力プロフィールを図4.2に示す。この結果より、蓄電池を使用しない場合(before)に比べて個別最適化(local)も提案手法(coordination)もピーク電力を削減できていることがわかる。また、個別最適化では電力量料金の変わり目に新たなピーク(リバウンドピーク)が発生しているのに対し、提案手法ではリバウンドピークを発生させずになめらかな需要パターンでピークを削減できていることがわかる。

また、蓄電池容量が3kWhの場合の各需要家の消費パターンの変化を図4.3に示す。この結果より個別最適化ではピークを発生している需要家(User1, User2)だけがピークを削減しているのに対して、提案手法では同じ時間帯に電力消費をマイナス(逆潮)にすることによって、全体のピーク削減に協力していることがわかる。

図4.4に各需要家の蓄電池容量を変化させた場合の、グループ全体の電力コストとグループ全体のピーク電



(a) 蓄電池の容量 1kWh



(b) 蓄電池の容量 3kWh

図 4.2: グループ全体の電力プロフィール (before:蓄電池なし, local:個別最適化, coordination:提案手法)

力を比較した結果を示す。どちらの場合も各需要家の蓄電池容量が増えるほど電力コストの削減ができていくが、個別最適化に比べ提案手法ではより大きなピーク削減を達成でき、グループ全体の電力コストの削減も達成できていることがわかる。

これらの結果より、個別最適化では自分自身が持つ蓄電池容量の範囲内で個々のピーク削減が可能であるが、提案手法では需要家間の協調によって他の需要家が発生させているピークの削減に協力することができ、グループ全体ではより大きなピーク削減効果が得られていることがわかる。また互いに協調しながら蓄電池の充放電パターンを決めるため、グループ全体にリバウンドピークや極端な電力使用パターンの変動を起こすことなく需要パターンの平準化を実現できることがわかる。

4.3. 各需要家としての協調による効果の検証とコストモデルの評価

次に、提案手法によるグループ全体のコスト削減のメリットを、各需要家のメリットに還元するためのコ

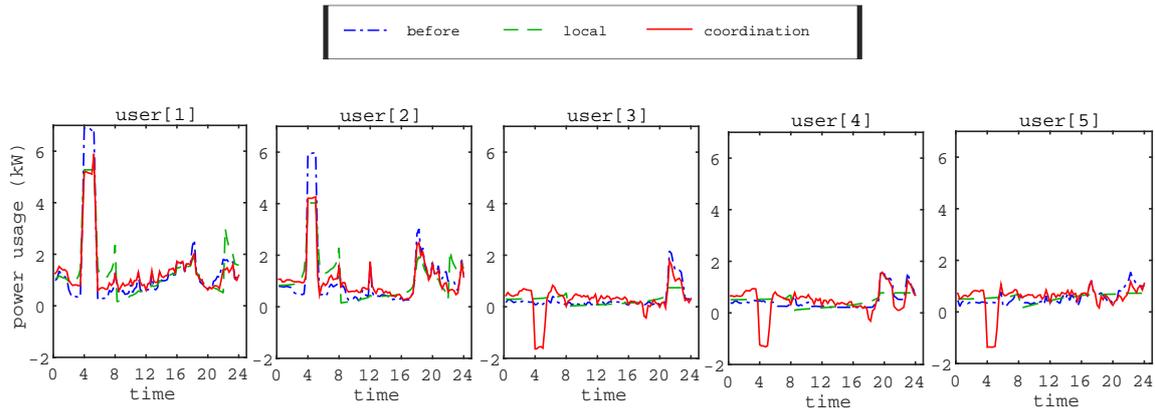


図 4.3: 各需要家の電力プロファイルの変化 (蓄電容量が3kWhの時)

ストモデルについて検証する。ここで妥当なコストモデルの条件は、需要家が協調型エネルギー管理のグループに参加するインセンティブとして、個別最適化より協調を行うほうがコストが削減できること、また協調に参加した需要家間では、貢献度合いに応じてコストが削減できることである。

図 4.5 は、3.3.2 節で述べたコストモデルによって各需要家の電力コストがどのように変わるのかを、蓄電池容量の影響も含めて比較した結果である。まず全需要家の蓄電池容量が同じ (3kWh) 場合 ((a) から (d))、グループピーク配分方式 (b) では需要家によって個別最適化のほうがコスト低くなっており、需要パターンによっては協調に参加するメリットがないことがわかる。個別最適化のほうがコストが下がっているのは User1 と User2 であり、これらの需要家はグループ全体のピーク時間帯に大きな電力消費を行なっている需要家である。グループピーク配分方式以外では個別最適化 (local) より提案手法 (coordination) のほうが全ての需要家において電力コストが削減できていることがわかる。

次に、ある需要家の蓄電池容量を変化させた場合のコストの変化を確認する。これは提案手法においては特定の需要家の協調の貢献度を変化させたと考えることができる。User1 の蓄電池容量を変化させた場合 ((e) から (l))、グループピーク配分方式、需要家ピーク配分方式、完全従量方式では、User1 の蓄電池容量の変化に応じて他の需要家よりコスト大きく変化していることがわかる。また、User4 の蓄電池容量を変化させた場合 ((m) から (t)) では、需要家ピーク配分方式では User4 のコストはあまり変化せず、グループピーク配分方式で User4 の蓄電池容量に応じたコスト削減効果が得られていることがわかる。

この結果は、User1 はグループ全体の需要ピークとなる時間帯の消費電力が大きいため、需要家ピーク配分方式で大きなコスト削減効果が得られるが、User4 のように需要ピークの時間帯の消費電力がもともと大きくない需要家の場合、ピーク削減に貢献しても自分自身のコスト削減には繋がっていないためであると思われる。これらの結果より、全体のピーク削減への貢献に対してインセンティブを持たせるにはグループピー

ク配分方式が向いていると言える。

5. 結論

本研究では、各需要家に分散的に設置した蓄電池を協調させることにより、蓄電池の空いた容量等も含め最大限活用するための分散最適化手法を提案するとともに、グループ内で連携するインセンティブが各需要家に働くようなコストモデルについて検討した。このとき、グループ内のコーディネータの母体は、新電力や将来的な小売事業者を想定し、市場等から電力を調達する (前日は計画策定と調達、当日はインバランス最小化を行う) と考える。

本研究のシミュレーションでは、単純な場合として一括受電を対象とした。その結果、各需要家が独立に蓄電池の充放電パターンの最適計画を行う場合に比べ、グループ内の連携によって、協調的に蓄電池の分散最適計画を行う方がグループ全体の電気料金削減につながることを示した。

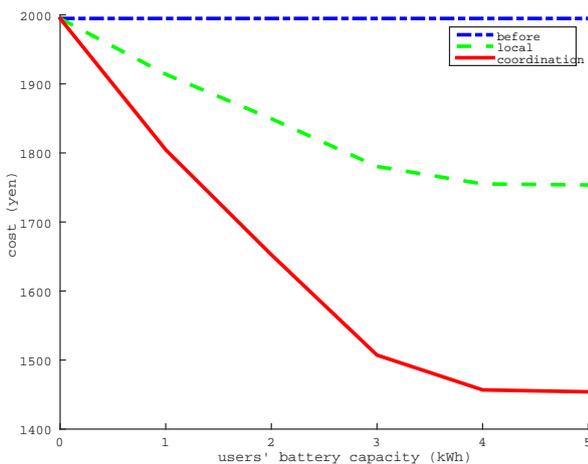
また、4通りのグループ内コストモデルを定義し比較した結果、グループ全体のピーク時間帯の各需要家の電力使用量に対してピークコストを課すグループピーク配分方式が、全体ピーク削減への需要家の貢献に対するインセンティブとなるものの、需要家の需要パターンによっては個別最適化を行うほうがよりコスト削減につながる結果となり、協調への参加インセンティブは需要パターン依存であるという結果となった。今後はどのような需要パターンの需要家に対しても協調参加インセンティブとグループ全体への貢献インセンティブを両方同時に与えることのできるコストモデルについて検討が必要である。

発送電分離とともに、託送料金の見直し (系統設備の利用に対応した需要地近接性の考慮など) が電力システム改革の制度設計 WG 等においてまさに議論されている最中ではあるが、環境面からも需要側で分散配置された蓄電池を連携し、送配電損失を削減することの効果は大きいと考えられる。したがって今後は、本提案手法をより現実的な設定で行っていく必要がある。これには、

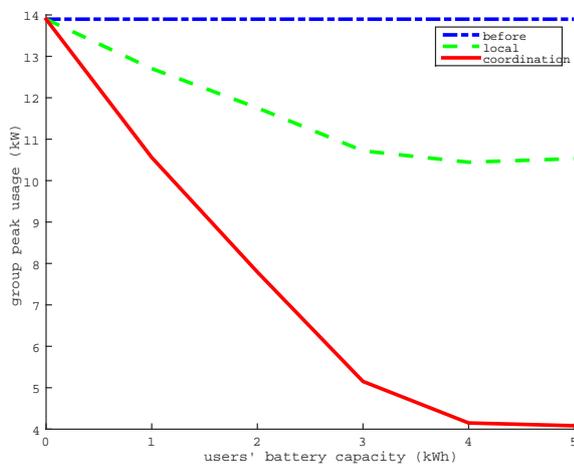
- 市場等からの電力調達を想定



図 4.5: コストモデルと蓄電池容量の変化に対する需要家のコスト比較 (横軸の1から5は需要家の番号)



(a) コーディネータの支払うコストの変化



(b) グループ全体の電力使用のピークの変化

図 4.4: 各需要家の蓄電池の容量を変化させた時のグループとしてのふるまい

- 蓄電池の損失や初期投資コストの考慮
- 送配電網を利用するコスト（託送料金等）や自営線の物理的損失の考慮
- 需要家数や多様性の影響の考慮
- 特定の1日だけでなく年間を通じた連携効果の検証

などの検討が挙げられる。特に、今回は一括受電を扱ったが、これでは蓄電池の分散配置の効果が集中配置に対して限定的であると考えられるため、同一敷地内の需要家だけではなくより広域の需要家を対象とし、さらに将来の電力システムの制度を踏まえた調達方法を想定することは重要である。

さらに、蓄電池以外の需要家内機器の制御や、需要家のQoLの考慮、発電設備の考慮については今回の研究で十分に扱えておらず、当日段階でのオンライン連携手法およびプロトコル設計も含め、今後の課題とする。

参考文献

- [1] M.H. Albadi and E.F. El-Saadany. Demand response in electricity markets: An overview. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1–5, 2007.
- [2] 服部徹, 戸田直樹. 米国における家庭用デマンドレスポンス・プログラムの現状と展望—パイロットプログラムの評価と本格導入における課題—. 電力中央研究所 研究報告書 (Y10005), 2011.
- [3] Takekazu Kato, Kento Tamura, and Takashi Matsuyama. Adaptive storage battery management based on the energy on demand protocol. *3th IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2012)*, pp. 43–48, Nov. 2012.
- [4] Hiroaki Kawashima, Takekazu Kato, and Takashi Matsuyama. Distributed mode scheduling for coordinated power balancing. *4th IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2013)*, pp. 19–24, Oct. 2013.
- [5] Stephen Boyd, Neal Parikh, Eric Chu, Borja Peleato, and Jonathan Eckstein. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends in Machine Learning*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–122, 2010.
- [6] 小笠原潤一, 森田雅紀. 海外における電力自由化動向—PJMとNord Poolを中心として—. 日本エネルギー経済研究所, 2001.
- [7] 南部鶴彦. 電力自由化の制度設計—系統技術と市場メカニズム—. 東京大学出版会, 2003.
- [8] 日本建築学会・住宅内のエネルギー消費量に関する調査研究委員会. 住宅におけるエネルギー消費量データベース. <http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/database/index.htm>.