

複数の家庭用蓄電池の共有化による コミュニティ型電力マネジメントの提案

Community Electric Power Management Model for Sharing Home Batteries

吉村卓也 *1 金森亮 *2 伊藤孝行 *3
Takuya Yoshimura Ryo Kanamori Takayuki Ito

*1 名古屋工業大学大学院情報工学専攻

Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology

*2 名古屋工業大学

Nagoya Institute of Technology

*3 名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻

Master of Techno-Business Administration, Nagoya Institute of Technology

An electric power system that introduces renewable energy is the focus of attention as the future electric network. However, renewable energy has a problem that production of electricity power is not stable. The renewable energy instability can cause two problems: lack of supply for demands, and disposal of much surplus power. In this paper, we propose a community-based electric power management for sharing home batteries to address the problem of the renewable energy instability. In this mechanism, homes can use the amount of charge efficiently and reduce the cost of the storage battery.

1. はじめに

再生可能エネルギーを導入した次世代電力ネットワークが世界的に注目を集めている。しかし、再生可能エネルギーの出力は環境の状態に大きく依存するため、再生可能エネルギーを制御するための取り組みが必要とされている。再生可能エネルギーの不安定性の影響を吸収するために蓄電池が利用され、大規模蓄電池を導入することで不安定な問題を緩和できる [Alam 13, Kanamori 13]。大規模蓄電池を導入した電力ネットワークを図 1 に示す。図 1 では、大規模蓄電池を設置した

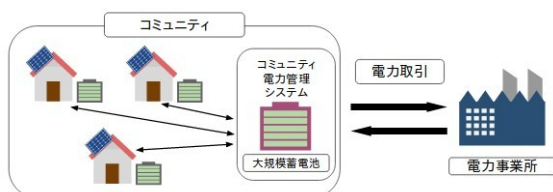


図 1: 大規模蓄電池を所有したコミュニティを導入した電力ネットワークモデル (既存手法)

コミュニティを導入し、大規模蓄電池の蓄電量から家庭に電力を供給する。しかし、蓄電池のコストは高いため、規模の拡張は容易ではない。多数の世帯の余剰電力を受け入れるために大規模蓄電池を設置することで、供給側のコストが非常に高くなる問題がある。

本稿では、大規模蓄電池を用いない電力ネットワークモデルを提案する。複数家庭の蓄電池を一つの大規模な蓄電池として扱い、家庭間の電力融通を効率的に行うためのコミュニティを導入する。既存手法との違いは、導入するコミュニティが大規模蓄電池を所有せずに発生する余剰電力を有効利用する仕組みとなっていることである。また、本稿では再生可能エネルギーとして太陽光発電を用いる。

連絡先: 吉村卓也, 名古屋工業大学, 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, yoshimura.takuya@itolab.nitech.ac.jp

評価実験では、エージェントシミュレーションを用いて行う。電力事業所の発電量を比較し、太陽光発電の有効利用を評価する。電力事業所とコミュニティのトータルコストを評価する。2つのコストを評価し、電力ネットワークの低コスト化について考察する。

本稿の構成は、2章でコミュニティによる蓄電池共有化について述べる。3章で家庭における電力マネジメントについて述べる。4章では、エージェントシミュレーションによる評価実験について述べ、本稿のモデルを評価する。5章では本研究の関連研究について述べる。最後に、本稿のまとめと今後の課題について示す。

2. コミュニティによる蓄電池共有化

2.1 蓄電池の空き容量に基づく電力配分

本稿で提案するコミュニティは、家庭の蓄電池の空き容量に応じて電力配分料を決定する。

図 2 に提案する蓄電池を共有化するコミュニティを導入した電力ネットワークを示す。

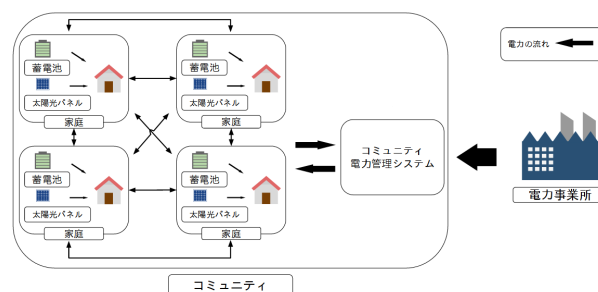


図 2: 大規模蓄電池を所有しないコミュニティを導入した電力ネットワークモデル (提案手法)

コミュニティ電力管理システムは、電力事業所から受け取る電力を家庭に配分する。各家庭に対する電力配分は、蓄電池の空き容量が多い家庭に対して配分量を多くする。また、電力分

配の対象は購入する家庭にだけ行われる。家庭が販売する電力は電力を購入する家庭に電力融通される。図2は、コミュニティは大規模蓄電池を所有せず、所属する家庭の電力配分や家庭の余剰電力の買い取りを行い、家庭の間の電力融通を行う。電力を購入する家庭の蓄電池の集合を次の式(1)に示す。

$$S = \{s | s_k, b_k > 0, k = 1, \dots, N\} \quad (1)$$

N は家庭数である。 b_k は家庭 k の電力購入量である。 s_k は家庭 k の蓄電池の空き容量である。式(1)から、集合 S は、電力の購入量が0より大きい家庭を対象にし、家庭の蓄電池の空き容量を要素に持つ集合である。

次に、蓄電池の空き容量に基づく重み付け関数を式(2)に示す。

$$w_n = \frac{s_n}{\sum_{s_l \in S} s_l} \quad (2)$$

式(2)は、家庭 n に対する重み関数である。家庭 n の重み w_n は、家庭 n の蓄電池の空き容量 s_n を集合 S の総和で割った値である。コミュニティは、蓄電池の空き容量が多い家庭に対して、多くの電力を割り当てるように重み付けを行う。

次に、各家庭への電力配分を次の式(3)に示す。

$$E_n = \begin{cases} s_n & (s_n < \hat{E}_n) \\ \hat{E}_n & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

\hat{E}_n は家庭 n への配分する予定の電力量である。 $u(t)$ は時刻 t での、コミュニティが家庭へ送電できる電力供給量である。

家庭 n の電力配分量 E_n は、蓄電池の空き容量 s_n が配分予定の電力量 \hat{E}_n よりも少ない場合は、空き容量分の電力を配分する。それ以外の場合は、予定する配分量 \hat{E}_n を配分する。

また、 \hat{E}_n は式(2)で求めた重み w_n を用いて、次の式(4)で求める。

$$\hat{E}_n = w_n u(t) \quad (4)$$

$u(t)$ は、時刻 t でコミュニティが電力事業所から受け取る電力量を表す。条件式(3)は、空き容量よりも送電量 \hat{E}_n が多い場合、送電する電力量を空き容量分を送るという制約条件である。式(3)及び式(4)から得られた送電量 E_n を全ての家庭に対して求めて電力の供給を行う。

2.2 電力事業所によるサポート

コミュニティが家庭に対して電力配分や電力の買取を行うが、必ずしも電力供給及び買取が成立する保証はない。コミュニティから受け取る供給量では電力需要を満たす時、家庭は電力事業から不足する電力量を直接買い取る。また、コミュニティが共有化した仮想的な大規模蓄電池の空き容量を超える余剰電力が発生したとき、家庭は電力事業所に電力を買い取ってもらうことが出来る。ただし、電力事業所との直接電力取引はコミュニティとの取引と価格設定が異なり、購入するときは高めに設定され、販売するときは低い価格に設定される。

3. 家庭の電力マネジメント

3.1 最適化による蓄電計画

蓄電池利用を効率化するために、1日の蓄電池利用を最適化し、蓄電計画を立てる。蓄電計画は、過去の購入量、蓄電池状

況、電力価格、及び電力需要を用いて、最適な放電量(蓄電量)を算出する。

最適化問題で用いる目的関数は次の式(5)で定義する。

$$\arg \min \sum_{t=1}^T \left(\{\hat{D}(t) - (\hat{b}(t) + v(t) + \hat{P}V(t))\}^2 + \hat{b}(t) \hat{p}(t) \right) \quad (5)$$

変数 t は分単位のタイムステップを表し、 T は 60×24 の1日の時間を表す。

$\hat{D}(t)$, $\hat{b}(t)$, $v(t)$, $\hat{P}V(t)$, 及び $\hat{p}(t)$ は、それぞれ時刻 t での電力需要、時刻 t での電力購入量、時刻 t での蓄電池からの放電量、時刻 t での太陽光発電量、及び時刻 t での電力価格を表す。ただし、 $\hat{b}(t)$, PV , 及び $\hat{p}(t)$ は過去数日分の実績値の平均値として与えられる。式(5)は、時刻 t で必要な電力から得られる供給量 $\hat{b}(t) + v(t) + \hat{P}V(t)$ を引いた値をコストとして、コストが最小となる $v(t)$ を求める目的関数である。 $v(t)$ は蓄電池容量の制約条件で与えられる。制約条件は式(6)で与えられる。

$$-\left(e(0) + \sum_{i=1}^{t-1} v(i)\right) < v(t) < e_{capa} - \left(e(0) + \sum_{i=1}^{t-1} v(i)\right) \quad (6)$$

$e(0)$, 及び e_{capa} はそれぞれ、時刻0での蓄電池の蓄電量、及び蓄電池容量を表す。 $e(0) - \sum_{i=1}^{t-1} v(i)$ は時刻 $t-1$ のときの蓄電池の蓄電量である。式(6)から、放電量 $v(t)$ は負の値を取ることがあり、負の放電量とは、すなわち蓄電量のことを示している。つまり、 $v(t)$ が負の時は蓄電池へ蓄電することを表し、蓄電池に出入りする電力量の値 $v(t)$ を最適化する。

3.2 太陽光発電予測

太陽光発電は、天候に大きく左右されることや、時間帯によって発電出力が大きく変化する。季節によって発電量も変わるため、これらの天候及び季節の特性を考慮する必要がある。本稿で設計する予測モデルでは先に述べた天候と季節の特性を考慮して以下の(a), (b), 及び(c)の処理を行う。

- (a). 天候毎によるパターンの識別
- (b). 過去のデータから類似性の高いパターンを検索
- (c). 蓄積データの周期性による季節変動の考慮

(a) では、家庭のエージェントが保持している蓄積データとして天気予報別に分けて記憶する。(b) では、追跡してきた発電量の推移を特徴ベクトルとみなして、過去の履歴のデータから類似した波形を検索して調整していく。(c) では、過去の履歴から検索するデータの範囲を指定する。現在追跡している時期が何時の季節かによって検索場所を動的に変動させ、季節による変動影響を考慮する。

平均的な天候の発電曲線のモデルは、気象庁が提供する晴れ日数、曇り日数、及び雨日数から定義する。太陽光発電量のモデルは日本気象協会の太陽光発電用標準気象データ METPV-11[Association 12]を用いている。

4. 評価実験

4.1 実験設定

評価実験では、家庭エージェント、電力事業所エージェント、及びコミュニティエージェントの3つの構成要素からなる電力ネットワークを用いたエージェントシミュレーションを行う。実験では次の【Case 0】【Case 1】、及び【Case 2】の3つの電力ネットワークモデルを比較する。

【Case 0】コミュニティなしの電力ネットワーク

【Case 1】大規模蓄電池を所有するコミュニティを導入した電力ネットワーク

【Case 2】複数家庭の蓄電池を共有化するコミュニティを導入した電力ネットワーク（提案手法）

【Case 0】は電力事業所と家庭のみで形成される電力ネットワーク、【Case 1】では大型蓄電池を所有するコミュニティが導入された電力ネットワーク、及び【Case 2】では、本稿で提案する家庭用蓄電池を集約し共有化するコミュニティが導入されたネットワークとする。

家庭の蓄電池の容量を均一または不均一での影響を検証するため、家庭の蓄電池容量に偏りを与えた評価を行う。提案手法の【Case 2】から蓄電池の容量を均一または不均一にした【Case 2-1】、及び【Case 2-2】を比較する【Case 2-1】は、コミュニティに属する家庭エージェントの蓄電池容量を5kWhで均一にする。【Case 2-2】は、家庭エージェントの蓄電池容量に、2kW、4kW、5kW、6kW、及び8kWと偏りを与える。シミュレーションは1年間の365日で行う。家庭エージェント数は15世帯である。電力事業所エージェントは1件設置する。また、電力事業所エージェントの発電計画は1日に124kWhとする。【Case 1】のコミュニティが所有する大規模蓄電池の容量は、家庭の3世帯分の容量の15kWhを設定する。発電計画は、家庭の1日の平均的な電力需要は8.3kWhであり、15世帯分で124kWhと設定する。コミュニティエージェントの数は3件である。コミュニティに所属する家庭数は5世帯で固定する。また、電力事業所のサポート時は、買い取り価格、及び販売価格は、それぞれ20(円/kWh)、及び24(円/kWh)とする。

4.2 実験結果と考察

図3に、電力発電所の総発電量のグラフを示す。図3から、【Case 1】と【Case 2】の電力事業所の発電量はほとんど同じ値を示している。電力事業所の発電量が少なくなることは、家庭が太陽光発電の電力を多く利用しているからである。実験結果から、本稿の提案する手法は、大規模蓄電池を導入した時と同様に太陽光発電の有効利用ができる。

次に、電力ネットワークのコストを、電力事業所の損失とコミュニティの損失で示す。電力事業所の損失は、電力の販売量及び買い取り量から計算する。コミュニティの損失は、電力の販売量と買い取り量に加え、蓄電池の導入コストも損失として考慮する。

【Case 1】の電力事業コストが負の値を示すのは、電力事業所が利益を得ているためである。【Case 1】の特徴として、電力事業所は利益を得ている傾向がある。また、コミュニティのコストは、蓄電池規模が大きくなるに連れて高くなる傾向がある。【Case 2】の電力事業所コスト及びコミュニティコストは、家庭別で蓄電容量が異なるときのほうがコストは高くなる。トータルコストを比較すると【Case 2】が最小値を示し、

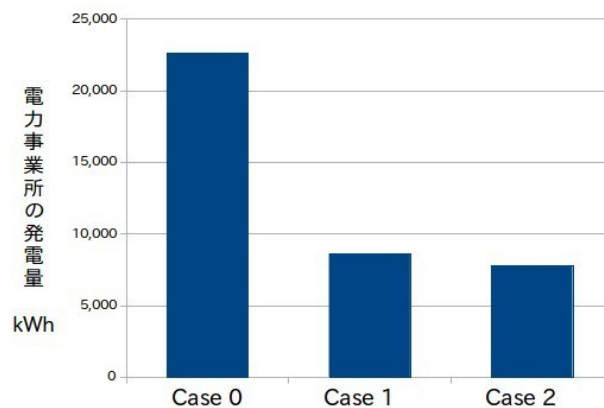


図3: 電力事業所の総発電量 (kWh)

【Case 1】が最大値を示す。また、図4にトータルコストをグラフで示す。

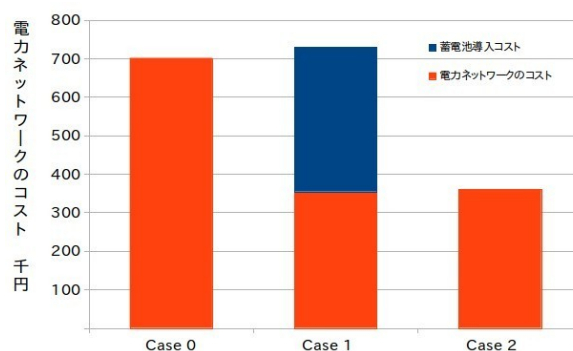


図4: 電力事業所及びコミュニティのトータルコスト

図4から【Case 0】が最もコストが高く、【Case 2-1】のコストが最も低い値を示した。図4の結果から、本稿で提案する家庭用蓄電池を共有化するコミュニティを導入した電力マネジメントは、トータルコストを低減することができ、社会的コストの低減にとっての有効性を示した。

しかし【Case 2-1】と【Case 2-2】を比較すると【Case 2-2】の損失のほうが高くなる。従って、蓄電池の規模が大きければ電力の購入量が少なくなり、余剰電力の融通機会が増えること示唆する。つまり、家庭の蓄電池規模は、家庭の販売できる電力量や購入する電力量に影響が出る。家庭用の蓄電池容量の違いにどのような影響が及ぼされるかを、家庭の収支を比較して考察する。

図5は、家庭の蓄電池規模に伴う家庭の利益の傾向を示す散布図である。家庭の損失には蓄電池の導入コストを考慮する*1。

図5の結果から、蓄電池規模が大きくなるほど家庭の利益は上昇している。しかし、家庭の蓄電規模が大きくなるに連れて、上昇率が逡減する。家庭の太陽光発電が蓄電池容量を超えて発電し、超過した分を電力事業所に買い取ってもらうため、電力事業所の買い取り量が増え、電力事業所のトータルコストが増加する。また、図5から、利益の上昇率は容量の増加と

*1 蓄電池の導入コストは、ONE エネルギーの5.53kWの蓄電池に対して、月額3,045円を参考に示す。

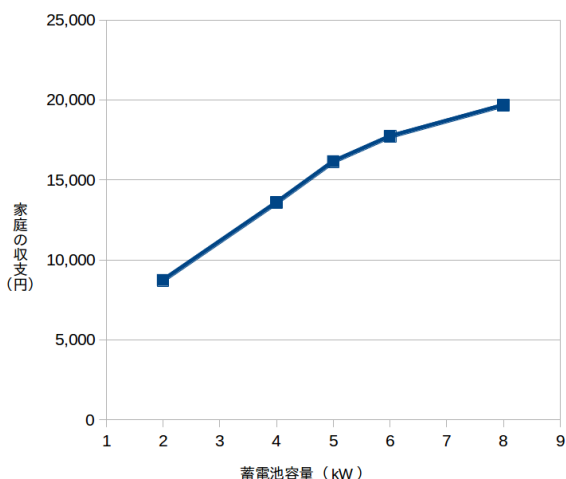


図 5: 家庭用蓄電池の規模による家庭の利益の傾向

共に減少するため、ある一定の蓄電容量からはほとんど利益が変わらなくなる。

【Case 2-1】と【Case 2-2】の結果からは、家庭の蓄電池に偏りを与えると、全体のネットワークにとっては損失が大きくなる。ネットワーク全体のコストが増加させないための電力マネジメントモデルが必要である。

5. 関連研究

文献 [Kanamori 13] では、コミュニティに大規模な蓄電池を導入し、余剰電力の有効利用を検証する電力マネジメントモデルを提案している。大規模蓄電池は余剰電力のバッファ機能として働き、電力が必要になった時に大規模蓄電池から電力が取り出せるようになっている。しかし、文献 [Kanamori 13] では、コミュニティ側の蓄電池の導入コストについては考慮されていない。本稿では大規模な蓄電池の導入コストを考慮する。

文献 [Alam 13] では、再生可能エネルギーによる発電設備と蓄電池を備えたコミュニティを導入している。また、コミュニティには大容量の蓄電池を想定している。本稿で提案するモデルでは、コミュニティは大容量の蓄電池を持たずに、より効率的に蓄電池を利用し、余剰電力を有効活用する。

文献 [Vytelingum 10] では、エージェントに基づく蓄電池のマネジメント手法を提案しており、電力の自由化の進んだイギリスの実際の電力消費データやリアルタイムで変化する電気料金モデルを用いてシミュレーションが行われている。しかし、文献 [Vytelingum 10] で定義するモデルでは再生可能エネルギーが想定されておらず、リアルタイム料金制における経済的蓄電池の有効利用や電力購入の戦略のみに主眼が置かれている。本稿では、太陽光発電の安定利用を考慮しており、また、ネットワーク全体におけるコストも考慮する。

また、文献 [Voice 11] は、文献 [Vytelingum 10] を発展させたモデルを提案している。文献 [Vytelingum 10] では電力の経済的な購入戦略を提案していたが、文献 [Voice 11] では家庭からの余剰電力の売却も扱っている。家庭だけでなく電力事業所にも戦略を定義して、家庭、電力事業所、及び市場における電力の価格決定モデルを提案している。

文献 [Voice 11] は、スマートグリッドの主要な課題の 1 つである電力の価格決定を扱う点が優れている。しかし、文献

[Voice 11] の家庭側の設定は本稿よりも簡略化されており、再生可能エネルギーの導入も行われていない。また、文献 [Voice 11] は電力売買を主題とするが、電力網全体のマネジメントに着目している。

6. まとめ

本稿では、コミュニティに基づく電力融通を取り入れた電力ネットワークモデルを提案した。蓄電池の空き容量が多い家庭に対してより多くの電力を配分することによって、発生する余剰電力を有効利用する。実験では、電力事業所の発電量と、コミュニティ及び電力事業所の 2 つのトータルコストを評価した。実験結果から、再生可能エネルギーの効率的な利用ができ、また電力ネットワークコストの低減化において有用であることを示した。家庭の蓄電池の偏りでコミュニティ及び電力事業所のコストは高くなることを確認した。家庭間では、取引におけるコストが原因で不平等が起こることがわかり、蓄電池容量に依存しない安定する電力マネジメントが必要であり今後の課題である。

謝辞

本稿の一部は、内閣府の先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発プログラム）により助成を受けています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [Alam 13] Alam, M., Rogers, A., and Ramchurn, S.: Interdependent multi-issue negotiation for energy exchange in remote communities, in *Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-13)*, pp. 25–31 (2013)
- [Association 12] Association, J. W.: Standard weather data for solar photovoltaics: METPV-11 (in Japanese), New Energy and Industrial Technology Development Organization: Annual hourly sunshine amount DB (2012)
- [Kanamori 13] Kanamori, R., Yoshimura, T., Kawaguchi, S., and Ito, T.: Evaluation of Community-Based Electric Power Market with Agent-Based Simulation, *Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, IEEE/WIC/ACM International Conference on (WI-IAT2013)*, Vol. 2, pp. 108–113 (2013)
- [Voice 11] Voice, T., Vytelingum, P., Ramchurn, S., Rogers, A., and Jennings, N.: Decentralised Control of Micro-Storage in the Smart Grid, in *AAAI-11: Twenty-Fifth Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1421–1426 (2011), Event Dates: August 7–11, 2011
- [Vytelingum 10] Vytelingum, P., Voice, T. D., Ramchurn, S. D., Rogers, A., and Jennings, N. R.: Agent-based Micro-storage Management for the Smart Grid, in *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Volume 1 - Volume 1*, AAMAS '10, pp. 39–46, Richland, SC (2010), International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems