

実需要データを利用した蓄電池シェアリングの効用推定に関する考察

○梶原 拓真 平田 研二 (富山大学) 和佐 泰明 (早稲田大学)
Mengmou Li (東京工業大学) Tam W. Nguyen (富山大学) 畑中 健志 (東京工業大学)

On Profit Estimation for Battery Sharing using Actual Demand Data

*T. Kajihara, K. Hirata (Univ. of Toyama), Y. Wasa (Wasada Univ.),
M. Li (Tokyo Tech.), T. W. Nguyen (Univ. of Toyama), T. Hatanaka (Tokyo Tech.)

Abstract— In this paper, we show the utility of the electricity storage operation when batteries can recharge each other in the case where there is an insufficient electricity demand from other batteries. The utility of this sharing is demonstrated by comparing a configuration where batteries are able and unable to charge each other when using the optimal charging capacity of the batteries. In addition, we verify to what extent a decrease in the storage-battery price compared to the current price is sufficient to make it profitable to install batteries.

Key Words: Sharing Economy, Electricity Storage, Arbitrage Dealing

1 はじめに

近年、個人が保有している使用していない物やサービスと使用したい人を peer-to-peer (P2P) で結びつける需要と供給のマッチングサービスとしてのシェアリングエコノミーが普及しつつある。電力分野にも分散型エネルギーの供給源として P2P のシェアリングエコノミーの期待は高まりつつある [1]。蓄電池を個人で運用するよりも集団でシェアリングすることでより大きな利益を生み出す状況があることを示した研究 [2] や蓄電池を所有している状態で、コストを削減するためにシェアリングに参加する利点があるかどうかを検討した研究 [4] などが報告されている。文献 [5] では太陽光発電と蓄電池をシェアリングするモデルが検討されており、個人で運用する場合と集団で運用する場合を比較しシェアリングすることによる節約額の算出が行われている。このように電力系統分野においてもシェアリングエコノミーの可能性は期待されているが大規模なシェアリングの導入は未だ行われていない。

本研究では蓄電池分野のシェアリングエコノミーとして、余っている住宅の蓄電池の電力を他の人へ提供、足りない電力需要を他の人の蓄電池から供給してもらう場合についての蓄電池運用を検討する。文献 [2] で定義された個人で蓄電池を運用する場合と蓄電池を共有して集団で運用する場合のコスト関数を使用する。これに対し、北九州市 城野地区 ゼロ・カーボン先進街区形成事業において計測された実需要データをもとに経験的確率密度関数、経験的累積分布関数の作成を行い、蓄電池導入量の最適化を検討する。最適化されたコスト関数をもとに個人で蓄電池を導入する場合と集団でシェアリングを実施する場合を比較することでシェアリングの有用性を検証する。また、現在の蓄電池の価格と比較してどの程度まで価格が減少すれば蓄電池を導入することによる利益が得られるのかを検証する。

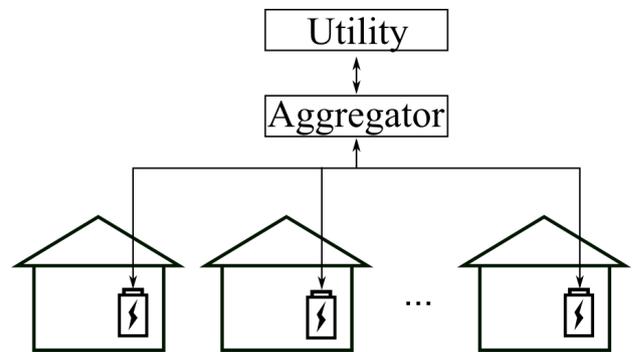


Fig. 1: Relationship between each house and the aggregator.

2 問題設定

本稿は文献 [2] の問題設定を参考にしてている。住宅 $k (= 1, \dots, n)$ のランダム変数の需要を X_k とし、その期待値を $\mathbb{E}[X_k]$ とする。

2.1 電力需要と電力価格の設定

電力を消費する n 軒の住宅を考える。電力会社と各住宅間はアグリゲーターが仲介しており、各住宅が使用する電力をまとめて電力会社から購入し、各住宅の電気の売買を取り持っている。アグリゲーター自身は中立な立場であり、電力を消費しない。Fig. 1 にその状況を示す。

電気料金の価格設定として1日をピーク時とオフピーク時の2つの時間帯に分ける時間帯別料金 (ToU: Time-of-Use Pricing) を考える。日中のピーク時には価格 π_h になり、夜間時間帯のオフピーク時には π_ℓ よりも低い価格 π_ℓ となる。 π_h, π_ℓ は固定で既知の価格である。 k 番目の住宅のピーク時とオフピーク時の確率変数の需要はそれぞれ X_k, Y_k とし、独立同一分布であるとす。ピーク時の需要 X_k の累積分布関数を $F_k(\cdot)$ とし、確率密度関数を $f_k(\cdot)$ とする。各住宅のピーク時の需要

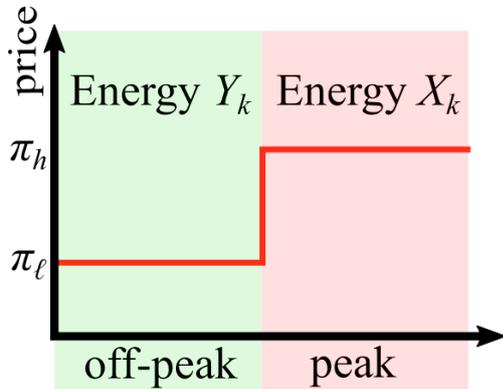


Fig. 2: "Time of Use Pricing" method.

X_k を足し合わせた全体の需要を X_c とする.

$$X_c = \sum_k X_k \quad (1)$$

また、各住宅の需要を足し合わせた全体の累積分布関数、確率密度関数をそれぞれ $F_c(\cdot)$, $f_c(\cdot)$ とする. 今回の問題設定において、オフピーク時の需要 Y_k は無視することができる. その理由として、 Y_k は電気料金 π_ℓ によって供給され、この部分は蓄電池を活用してもこのコストを削減することはできない. そのため、本稿ではオフピーク時の需要 Y_k は考慮しない.

蓄電池の価格が十分に安くなった場合の蓄電投資量について考える. 蓄電池を購入した価格から耐用年数で割ることにより 1 日あたりに償却される価格 π_s が算出される. ピーク時とオフピーク時の価格差による裁定取引によって 1 日の電気料金のコストが削減される. ピーク時とオフピーク時の価格差を表す裁定価格 π_δ と、どのくらい利益があるかを表す裁定定数 γ をそれぞれ

$$\text{arbitrage price} \quad \pi_\delta = \pi_h - \pi_\ell > 0 \quad (2)$$

$$\text{arbitrage constant} \quad \gamma = \frac{\pi_\delta - \pi_s}{\pi_\delta} \quad (3)$$

と定義する. 蓄電池への投資が利益を生むためには 1 日あたりの償却コスト π_s よりもピーク時とオフピーク時の価格差 π_δ が大きくなくてはならない.

$$\pi_\delta > \pi_s \quad (4)$$

蓄電池は電気代が安いオフピーク時に充電が行われ、電気代が高いピーク時に放電が行われる. 住宅 k の蓄電池投資の量を C_k とし、各住宅の蓄電池投資量を足し合わせた全体の蓄電池の投資量を C_c と表す.

$$C_c = \sum_k C_k \quad (5)$$

3 個人運用, シェアリング運用の定式化

蓄電池を個人運用する場合とシェアリングで運用をする場合のコスト関数の定義を行い、蓄電池導入量の最適化を検討する. なお、(8) 式、(13) 式の導出は文献 [2] を参照されたい.

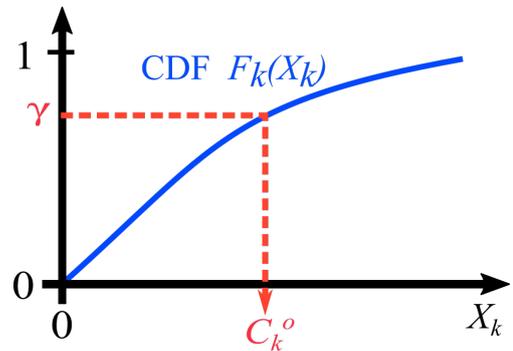


Fig. 3: Optimal storage capacity C_k^o given γ .

3.1 個人で運用する場合

各住宅それぞれが個人で蓄電池を運用する場合を考える. ピーク時の時間帯が始まると蓄電池に充電されている電気を放電する. その後、蓄電池の充電量だけで補えなかった場合、残りの需要 $X_k - C_k$ を π_h で購入をし、オフピーク時に価格 π_ℓ で充電を行う. そして、1 日あたり π_s の償却コストを支払う. その時の k 番目の住宅の 1 日あたりの期待値コストは (6) 式となる.

$$J_k(C_k) = \pi_s C_k + \pi_\ell \mathbb{E}[\min\{C_k, X_k\}] + \pi_h \mathbb{E}[\max\{X_k - C_k, 0\}] \quad (6)$$

このコスト関数を最小化する蓄電池投資量 C_k^o を選択する.

$$C_k^o = \arg \min_{C_k} J_k(C_k) \quad (7)$$

この最適な蓄電池投資量 C_k^o は (8) 式により与えられる.

$$F_k(C_k^o) = \frac{\pi_\delta - \pi_s}{\pi_\delta} = \gamma \quad (8)$$

Fig. 3 に (8) 式の累積分布関数と γ が与えられたときに最適蓄電容量 C_k^o が決定される様子を示す. 最適な蓄電池を導入した場合のコストは (9) 式で与えられる.

$$J_k^o = J_k(C_k^o) = \pi_\ell \mathbb{E}[X_k] + \pi_\delta \mathbb{E}[X_k | X_k \geq C_k^o] \quad (9)$$

ゆえに、個人で蓄電池を運用する場合は γ が定めれば最適蓄電容量と最適なコストが導出される.

3.2 シェアリングで運用する場合

n 軒の住宅が蓄電池のシェアリングの運用に参加する. ピーク時に自身の蓄電池から電力消費を行い充電が残っている場合は蓄電池の余剰分 $C_k - X_k$ を他の住宅に販売することができる. また、自身の蓄電池を消費しても消費量が不足している場合、 $X_k - C_k$ の不足分を他の住宅や電力会社から買い取ることができる.

蓄電池の電気料金の価格決定の方法として全体の蓄電投資量 C_c とピーク時の全体の電力消費量 X_c を比較して価格決定が行われる. Fig.4 に価格決定の方法を示す.

$X_c \geq C_c$ の場合は価格競争が行われ、電力会社が提示する価格 π_h まで価格を引き上げて取引が行われる. $X_c < C_c$ の場合にも価格競争が行われ各住宅が蓄電池

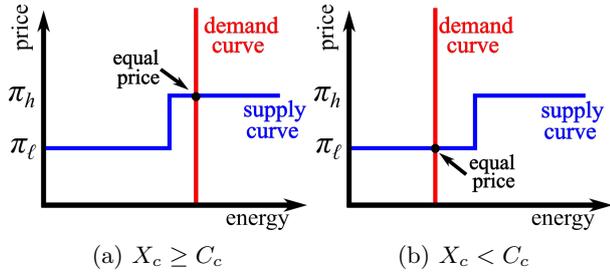


Fig. 4: Determination of equilibrium price.

を充電した価格 π_ℓ まで引き下げて取引が行われる。市場清算価格 π_{eq} の式を (10) 式に表す。

$$\pi_{eq} = \begin{cases} \pi_h & X_c \geq C_c \\ \pi_\ell & X_c < C_c \end{cases} \quad (10)$$

この市場清算ルールのもとで n 軒の住宅が蓄電池のシェアリング運用に参加する。 k 番目の住宅の 1 日の期待コストの式を (11) 式に示す。

$$J_k(C_k, C_{-k}) = \pi_s C_k + \pi_\ell C_k + \mathbb{E}[\pi_{eq}(X_k - C_k)] \quad (11)$$

1 日あたりの蓄電池の使用コスト π_s を償却する。オフピーク時に蓄電池を π_ℓ の価格で充電を行う。ピーク時に自身の電力消費量を蓄電池で補うことができない場合には、 π_{eq} の価格で $X_k - C_k$ 分の電気を購入する。反対に、ピーク時に蓄電池のみで自身の電力消費を補うことができた場合、 π_{eq} の価格で $C_k - X_k$ 分の電気を販売することができる。各住宅はこのコスト関数を最小化する C_k^* を選択する。

$$C_k^* = \arg \min_{C_k} J_k(C_k, C_{-k}) \quad (12)$$

このシェアリングを行う場合の最適な蓄電投資量 C_k^* を導く式は (13) 式の条件付き期待値で与えられる。

$$C_k^* = \mathbb{E}[X_k | X_c = Q], k = 1, \dots, n, \quad (13)$$

ここで Q は各需要家を足し合わせた全体の累積分布関数 F_c から求められ (14) 式で与えられる。

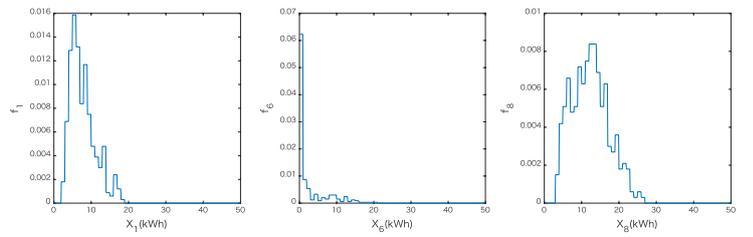
$$F_c(Q) = \frac{\pi_\delta - \pi_s}{\pi_\delta} = \gamma \quad (14)$$

コスト関数の最適化を行い蓄電池容量 C_k^* を導入した場合のコストは (15) 式になる。

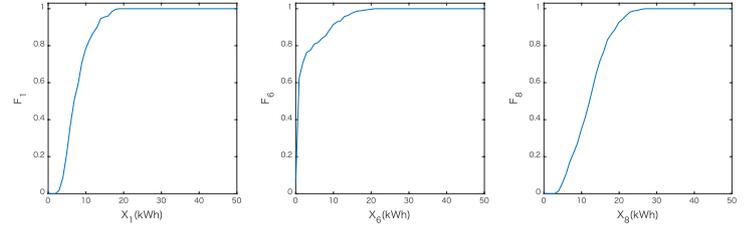
$$J_k^* = \pi_\ell \mathbb{E}[X_k] + \pi_\delta \mathbb{E}[X_k | X_c \geq C_k^*] \quad (15)$$

4 数値実験

北九州市 城野地区 ゼロ・カーボン先進街区形成事業において 2021 年 4 月 1 日から 2022 年 2 月 28 日までに実際に計測された住宅 10 軒分の実需要データを使用し蓄電池運用の数値実験を行う。九州電力の電化でナイト・セレクト [6] のプランを参考に、ピーク時の時間帯を朝の 8 時から夜の 22 時までの時間帯とし、 $\pi_h = 26.84$ Yen/kWh, $\pi_\ell = 13.21$ Yen/kWh, $\pi_\delta = 13.63$ Yen/kWh とする。



(a) Probability density function of each demander



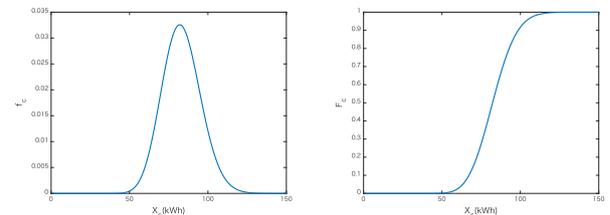
(b) Cumulative distribution function of each demander
Fig. 5: Examples of probability density functions and cumulative distribution functions for the first, sixth, and eighth houses.

4.1 確率密度関数, 累積分布関数の生成

各住宅の 1 日のピーク時の電力需要データから経験的確率密度関数, 経験的累積分布関数を作成する。ここでは代表的な分布の例として 1 軒目の一般的な分布, 6 軒目の需要が少ない分布, 8 軒目の一定の需要がある分布の住宅に着目する。Fig. 5 に経験的確率密度関数, 経験的累積分布関数を示す。実需要データから累積分布関数を作成することで γ が定まると個人運用する場合の蓄電池の最適投資量が算出される。

4.2 シェアリング運用する場合の蓄電投資量の決定

シェアリング運用する場合の最適な蓄電投資量を算出する。最適蓄電量を求めるには (14) 式の全体の累積分布関数から推定される Q の値を求め, (13) 式の $X_c = Q$ が与えられた時の条件付き期待値を求めれば良い。(14) 式より, シェアリング運用に参加する 10 軒分それぞれの確率密度関数 f_k を畳み込み積分により足し合わせて全体需要の確率密度関数 f_c を求める。各住宅の分布を畳み込み積分した全体の確率分布 f_c と全体の累積分布関数 F_c を Fig. 6 に示す。



(a) Convolved probability density function. (b) Convolved cumulative distribution function.

Fig. 6: Convolution integral of each demander's distribution functions.

全体の累積分布関数 F_c から γ が与えられると全体需要 Q がわかる。ここから (13) 式の条件付き期待値

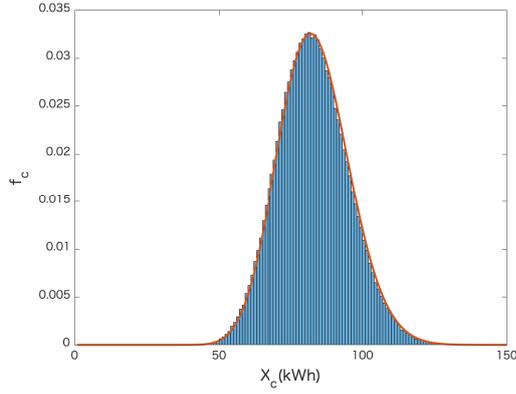


Fig. 7: Histogram of total demand by Monte Carlo simulation.

を求める. (13) 式を変形すると

$$\begin{aligned}
 C_k^* &= \mathbb{E}[X_k | X_c = Q] \\
 &= \sum_{x_i} x_i \mathbb{P}(X_k = x_i | X_c = Q) \\
 &= \sum_{x_i} x_i \frac{\mathbb{P}(X_k = x_i, X_c = Q)}{\mathbb{P}(X_c = Q)} \\
 &= \sum_{x_i} x_i \frac{f_{kQ}(x_i, Q)}{f_c(Q)}
 \end{aligned}$$

となる. ここで \mathbb{P} は確率を表す. 同時分布 f_{kQ} を作成するためにモンテカルロシミュレーションを行う. 各住宅が各々で確率密度関数を持ち, その分布のもとで需要量を選択する. 500,000 回の確率選択を行い, 全体の確率密度関数と確率選択で行なったヒストグラムが一致するか確認した図を Fig. 7 に示す. 各住宅がそれぞれ選択した需要量を足し合わせた全体需要のヒストグラムとそれぞれの確率密度関数を畳み込み積分した関数がほぼ一致していることから, 500,000 回の試行回数により同時分布を再現できると考えられる. ここで 500,000 回のモンテカルロシミュレーションから各住宅の需要分布と全体の需要分布のヒストグラムを作成する. 例として 1 軒目の住宅の需要分布と全体の需要分布の 3 次元のヒストグラムを Fig. 8 に示す. これにより, 全体需要 $X_c = Q$ の断面で切断し X_k の方面から見た分布が同時分布となり, f_{kQ} が得られる.

4.3 個人運用とシェアリング運用の比較

10 軒の住宅の実需要データからそれぞれの住宅が蓄電池を個人運用する場合と 10 軒で協力しシェアリング運用する場合の蓄電池運用の比較をし, 蓄電池を導入するコストの削減を考える. 協力する 10 軒のうち代表的な累積分布関数をしている住宅が 4 軒ありそのグループを Group 1, 需要が少ない累積分布関数の住宅が 3 軒ありそのグループを Group 2, 一定の需要負荷がある住宅が 3 軒ありそのグループを Group 3 とする.

γ を変えることによるそれぞれのグループの蓄電池容量の平均, コスト関数の値の平均を見る. Fig. 9 に γ を変えることによる Group 1, Group 2, Group 3 それぞれの蓄電池容量の平均を示す. γ の値が小さいとき

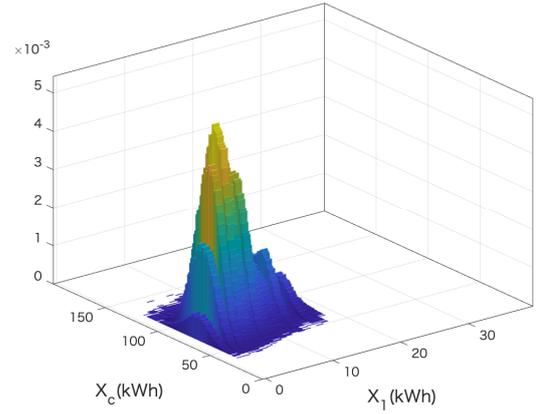
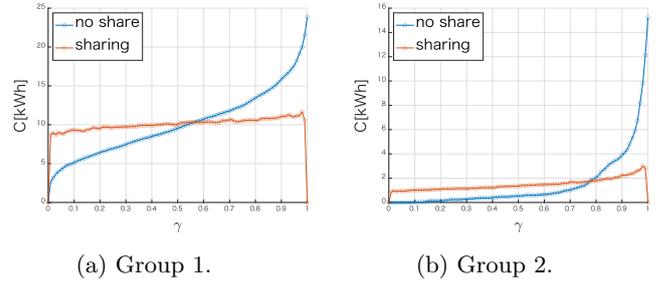
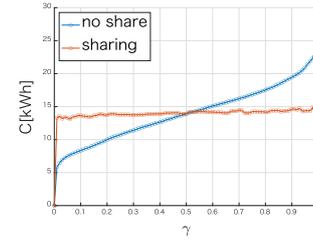


Fig. 8: 3D histogram of demand distribution of X_1 and X_c .



(a) Group 1.

(b) Group 2.



(c) Group 3.

Fig. 9: Optimal storage capacity for individual and sharing operations.

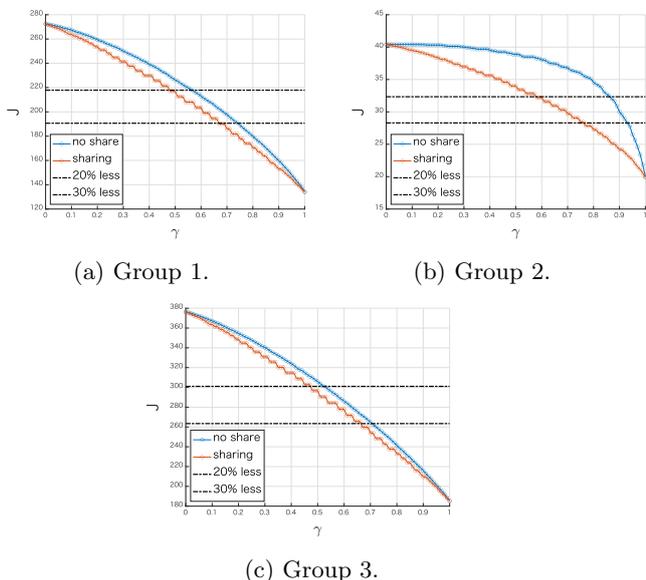
にはシェアをする機会があるため, 個人で運用するよりも蓄電池投資量を多く投資することになり. 反対に, γ が大きくなると蓄電池投資量が少なくてもシェアされる機会があるため個人運用よりも蓄電池投資量が少なくなる結果になった.

次に γ を変えることによるコスト関数の変化を見る. Fig. 10 に γ を変えることによる Group 1, Group 2, Group 3 それぞれのコスト関数の平均を示す. 全てのグループにおいて個人運用する場合よりもシェアリングで運用する場合の方がコストを削減することができる.

次に蓄電池を導入する価値について考察を行う. 蓄電池を導入しない場合のコストはピーク時の電力需要を全て π_h で購入するので, コスト関数は $J_k^{nc} = \pi_h \mathbb{E}[X_k]$ と表される. Group 1 から Group 3 の J_k^{nc} の平均はそれぞれ 272.3577, 40.4207, 376.3225 Yen となっている. ここから蓄電池を導入することによりコストを 20%, 30% 削減したいとする. Table 1 にコストを 20%, 30% 削減させたときの個人運用とシェアリング

Table 1: γ and π_s when the cost function is decreased by 20%, 30%

	γ			π_s		
	Group1	Group2	Group3	Group1	Group2	Group3
20% less, no share	0.5700	0.8600	0.5200	5.8609	1.9082	6.5424
20% less, sharing	0.4800	0.5800	0.4500	7.0876	7.4965	5.7246
30% less, no share	0.7400	0.9300	0.7100	3.5438	0.9541	3.9527
30% less, sharing	0.6700	0.7500	0.6400	4.4979	3.4075	4.9068



(a) Group 1.

(b) Group 2.

(c) Group 3.

Fig. 10: Optimal cost function for individual and sharing operations

運用した場合の γ と π_s の値を示す。蓄電池を導入することで個人運用する場合、蓄電池の償却価格 π_s はそれぞれ 5.8609, 1.9082, 6.5424 Yen/kWh になれば電気料金を 20% 減少させることができる。この価格から蓄電池をシェアすることにより償却価格 π_s はそれぞれ 7.0876, 5.7246, 7.4965 Yen/kWh まで上昇させることができる。蓄電池シェアすることにより個人運用する場合とシェアリング運用する場合の蓄電池の価格差 1.2267, 3.8164, 0.9541 Yen/kWh を削減することができる。同様に蓄電池を導入することで電気料金を 30% 減少させるためには蓄電池の償却価格 π_s はそれぞれ 3.5438, 0.9541, 3.9527 Yen/kWh になれば良い。この価格から蓄電池をシェアすることにより償却価格 π_s はそれぞれ 4.4979, 3.4075, 4.9068 Yen/kWh まで上昇させることができる。シェアすることにより蓄電池の価格差 0.9541, 2.4534, 0.9541 Yen/kWh を削減することができる。今現在の蓄電池の償却価格は約 45 Yen/kWh 程度 [7, 8] になっており、蓄電池の価格が現在の 1/10 程度にならないと先物取引による利益が得られない結果となっている。

5 おわりに

本稿では、電力系統分野でのシェアリングエコノミーとして、蓄電池をシェアリング運用することによる最適蓄電量とコストの導出を検討した。実データから経験的累積分布関数、経験的密度関数を生成し、蓄電池投資量の最適化を検討した。また、個人運用する

場合とシェアリングでの集団運用を比較し、蓄電池をシェアリングすることによるコスト削減の有用性を確認した。蓄電池の償却価格がどの程度まで減少すれば蓄電池の取引が可能になるか検討した。今後の展望としては、実需要データをもとにコスト関数の定義を行い、蓄電投資量の最適化を行うことや蓄電池を個人で所有する場合と集団で所有する場合を比較することでシェアリングのさらなる可能性を検討することがあげられる。

謝辞

本稿に関して北九州市 城野地区 ゼロ・カーボン先進街区 形成事業において計測された実需要データの取得に関してご協力いただいた北九州市立大学 牛房義明先生、実需要データの処理をしていただいた早稲田大学 清水健至 さんに御礼申し上げます。

参考文献

- [1] W, Tushar, et al. Peer-to-peer energy systems for connected communities: A review of recent advances and emerging challenges. *Applied Energy* 282 (2021): 116131.
- [2] D, Kalathil, et al. The sharing economy for the electricity storage. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10.1 (2019).
- [3] 川島, 稲垣, 鈴木, EV シェアリングが担うエネルギー管理. 計測と制御, 2018, 57.3: 179-184.
- [4] P, Chakraborty, et al. Sharing storage in a smart grid: A coalitional game approach. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10.4 pp.4379-4390.(2018)
- [5] S, Henni, P, Staudt, C, Weinhardt. A sharing economy for residential communities with PV-coupled battery storage: Benefits, pricing and participant matching. *Applied Energy* 301 (2021): 117351.
- [6] https://www.kyuden.co.jp/user_menu_plan_denka-de-night.html
- [7] https://sumai.panasonic.jp/chikuden/sochiku/system/s_plus.html#power
- [8] <https://www.nichicon.co.jp/products/ess/list.html>