

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術普及編

地域電力事業者の運用改善のための
蓄電資源導入に関する研究

平成 30 年 3 月

Research on Introduction of Storage Facilities
for Improving Operation of Local Power Companies

Strategy for Technology Dissemination

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2017-PP-17

概要

近年の電力自由化の進展に伴い、地方自治体が関与する地域密着型の電力事業者である地域電力事業者の参入が増えつつある。一方で、地域電力事業者の多くは発電・調整資源が不十分であり、それに伴う困難が数多く生じて系統上の不安定性を引き起こす可能性があり、特に再生可能エネルギーの予測誤差による需給インバランスへの対処は重要な課題となっている。本書では、地域電力事業者がインバランスを補償するための新しい方法論について提案している。この目的のために、我々は地域電力事業者の収益性を考慮した数学モデルを開発し、定置型蓄電池と電気自動車の最適導入量および最適運用方法を明らかにした。分析の結果、事業者の経済性を損なうことなく需給インバランスの大幅な削減を行うことが可能であることが判明した。

Summary

Together with the liberalization of power systems, regional power companies are increasing, which are supported by the municipal governments. However, most of them own insufficient power generation resources, potentially causing instabilities in power systems. It is particularly critical how to deal with imbalances resulting from prediction errors in outputs of renewable power sources. In this report, we propose a novel procedure to use batteries and electric vehicles to deal with the imbalances. We develop a mathematical model, taking account of profitability of the companies, to clarify optimal introduction quantities and utilization procedures of batteries and electric vehicles. Computed results implied that the imbalances could be reduced by approximately 70% without decreasing profitability of the regional power companies.

目次

概要

1. 研究の背景	1
1.1 電力自由化の進展	1
1.2 地域電力事業者への期待と課題	1
1.3 研究目的	1
2. 地域電力事業者モデルの設計	2
2.1 地域電力事業者の前提	2
2.2 モデルの構築	2
2.3 参照データの作成	4
3. 定置型蓄電池の導入	5
3.1 定置型蓄電池導入の前提	5
3.2 定置型蓄電池導入効果算定モデルの構築	5
3.3 評価方法の定義	7
3.4 計算結果と考察	8
4. 定置型蓄電池+V2H 統合システムの導入	9
4.1 V2H システムの前提	9
4.2 統合システムの構築	10
4.3 計算結果と考察	10
5. まとめ	11
6. 政策立案のための提案	12
参考文献	12

1. 研究の背景

1.1 電力自由化の進展

2016 年 4 月の電力小売全面自由化に伴い、近年、電力小売事業への新規参入が漸増している。現在登録されている新電力事業者はガスや石油等の調達を本業とする事業者や、通信事業を本業とする事業者が大きな割合を占めているが、そのような市況の中において特別な注目を集めている事業者が存在する。その事業者とは、地方自治体主導で地域に根ざした電力事業を行う事業者であり、本研究ではそのような事業者を地域電力事業者(Local Power Company)と名付け、該当事業者に共通する課題に注目した分析を行う。

1.2 地域電力事業者への期待と課題

日本における地域電力事業者への注目の源として第一に挙げられるのが、自由化先行地域であるドイツで成功を収めているシュタットベルケ(Stadtwerke)と呼ばれる事業体である。戦前から存在するシュタットベルケは、自治体との資本関係を持ち、地域密着で各種エネルギーサービスを提供する事業体であり、ドイツの電力自由化に伴い激減すると予想されたのにも関わらず、現在でも 900 を超えるシュタットベルケが存続し、電力小売市場において 2 割強のシェアを保ち続けている。松井[1]の調査では、自治体との連携による地域特性に適合したサービスの提供による地域住民からの信頼の獲得や、公的な背景を持ちながらも電力調達戦略の高度化や地域特性に合った電力・熱事業の連携を行うことによるコスト競争力の向上が、その強さに貢献していると分析している。また、M. Engelken[2]による研究では、自治体から見て、シュタットベルケによるエネルギーの地産地消による税収増、地域の再生可能エネルギーの使用による地域住民の環境意識向上、私企業依存からの独立によるエネルギー政策の自由度拡大などの様々な恩恵が得られることも、発展の原因であると分析している。

現在の日本においては、地方創生が政策目標として掲げられ、様々な提案が行われているが、上記の調査研究で提示されているような効果を期待して、日本版シュタットベルケとしての地域電力事業者へ大きな注目が集まっている。

一方で、日本の地域電力事業者には様々な課題がある。代表的な課題を挙げると、

- 自社所有電源が少なく、その大半が太陽光や風力等の再生可能エネルギー電源であること
- エネルギー地産地消を目指した再生可能エネルギー電源からの調達割合の増加に伴い生じる不確実性に対処する資源がほとんどなく、需給管理が困難であること
- その地域性により、従来需給管理に重用されていた火力発電等の大規模可制御電源の導入の困難

などが挙げられる。これらの課題に対処するために、多くの地域電力事業者が注目している対策案が、各種蓄電資源の活用である。

1.3 研究目的

垂直統合型の電力事業が長く隆盛を誇っていた日本においては、小規模な電力事業者の運用に関する研究の蓄積は少ない。そのため、本研究においては、現状を踏まえた保有資産の少ない地域電力事業者の運用計画モデルの設計を緒として、それらの事業者が経済合理性を損なうことなく責任ある需給運用を達成する可能性について、定置型蓄電池や V2H(Vehicle to Home)を応用したシステムの導入モデルによる計算を通して分析していく。

2. 地域電力事業者モデルの設計

2.1 地域電力事業者の前提

本研究では、国内の代表的な地域電力事業者として注目されている事業者の実際の運用データを参考にして地域電力事業者をモデリングしている。当該事業者は、日射量の豊富な地域特性を活かし、合計容量 4MW 程度の地域の太陽光発電からの電力調達を優先的にを行い、不足分を九州電力の常時バックアップ電源や電力卸取引所から調達している。本研究では、常時バックアップ制度が将来的に廃止されるとの議論がなされていることを鑑みて、不足分は電力卸取引所から調達するものとする。また、太陽光発電の予測誤差による需給インバランスに関しては、現状では九州電力が対処を引き受けているが、新電力の増加に伴いそのような状況は解消されると想定し、地域電力事業者自身がその対処を行う必要があり、残余インバランスに関しては 16[円/kWh]の罰金が課されるものと仮定して計算を行う。

2.2 モデルの構築

前節の前提を踏まえて、図 1 のような地域電力事業者のモデルを構築する。

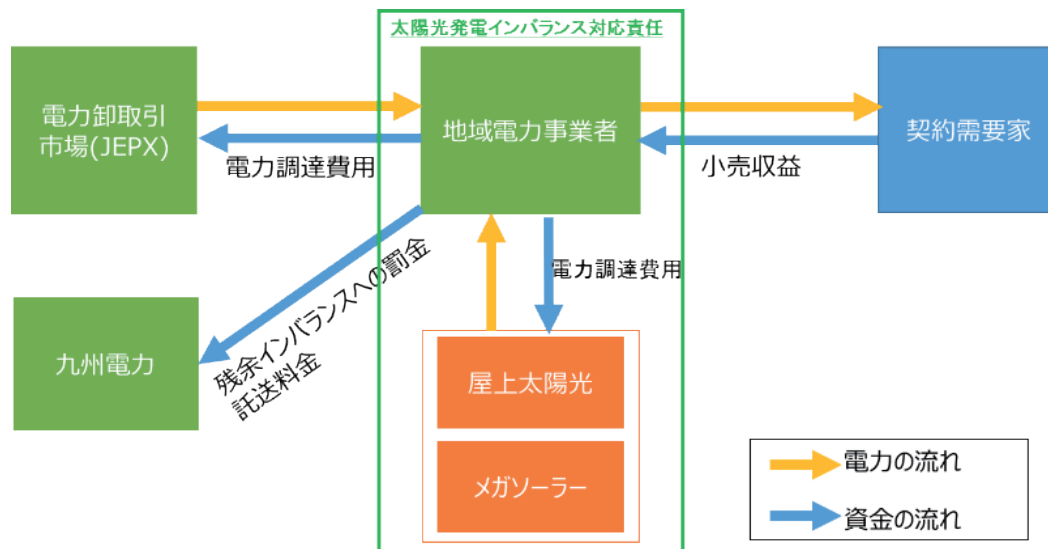


図 1 地域電力事業者のモデル

このモデルにおいて、地域電力事業者の期待売上総利益=小売収益－電力調達費用－託送料金－期待インバランス料金として、事業者はこれを最大化するような運用を行うとする。本章のモデルにおいては、未だ調整可能資源は導入されておらず、制約条件としては需給均衡制約のみとなる。期待インバランス料金の計算は、高橋[3]を参照し、ラプラス分布に従った誤差分布を図 2 に示すような 6 つの確率帯に離散化して、それぞれの誤差区分の対処しきれない部分をインバランスとして期待値計算を行っている。

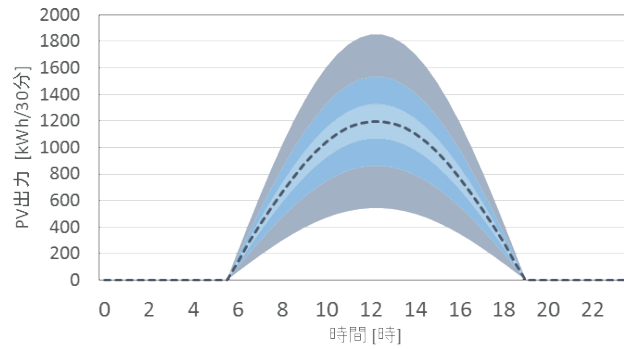


図 2 太陽光発電の予測誤差分布

また、図 3 に低圧需要量、高圧需要量、図 4 に電力卸取引市場価格、図 5 に電力小売価格のデータを示す。

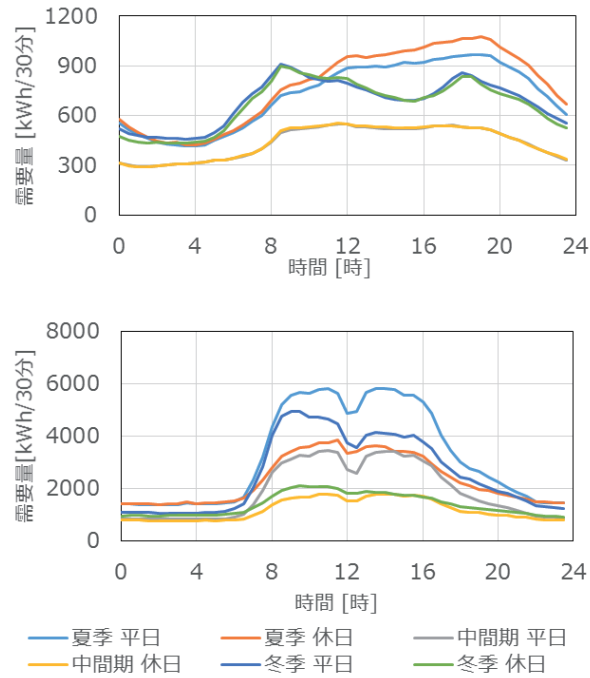


図 3 需要量(上:低圧、下:高圧)

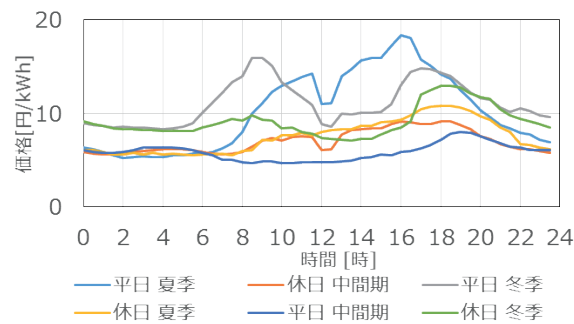


図 4 電力卸取引市場価格

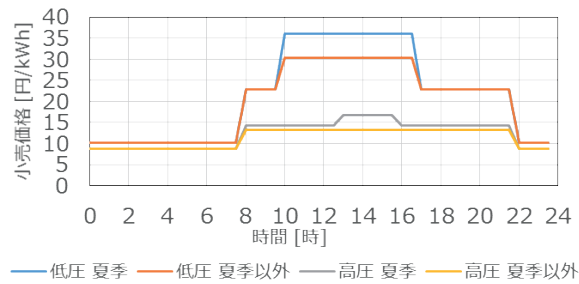


図 5 電力小売価格

これらのデータは当該地域電力事業者の実データを参考に作成されたものである。

2.3 参照データの作成

前節で示した条件の下で、以後の分析の参照データとなる地域電力事業者の収益構造を計算した結果が図 6 である。

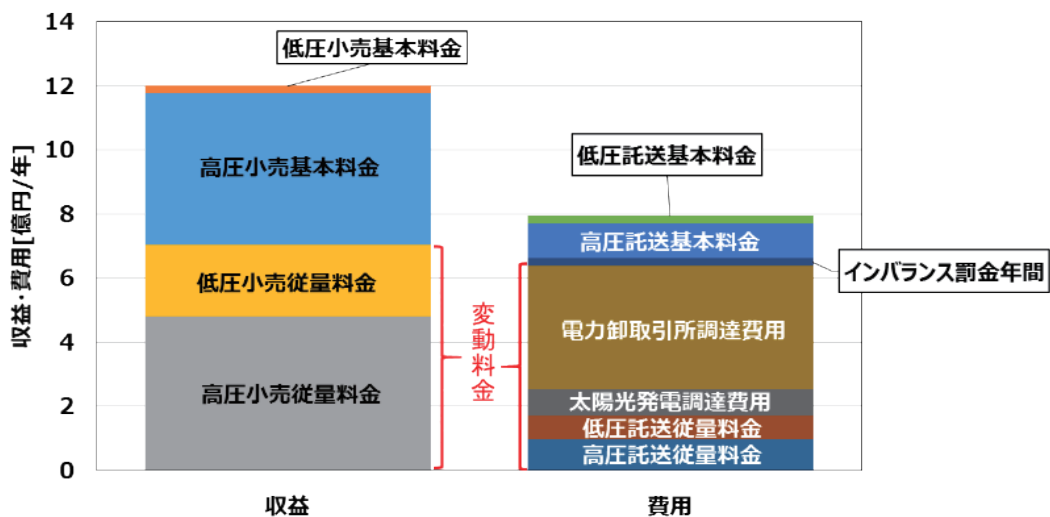


図 6 地域電力事業者の収益・費用構造

図 6 において、調達量に関連する部分や蓄電池等の導入によって変化する部分の利益を変動利益、その他の部分をベース利益と定義すると、年間の総ベース利益は約 364 百万円、総変動利益は約 41 百万円と計算される。利益全体に占める変動利益の割合は 10%程度ではあるものの、事業経営の評価として変動利益の増加を意識することが高度な運用へと繋がる重要な要素となる。以後の蓄電資源導入に関する分析においては、変動利益部分に着目して分析を行う。

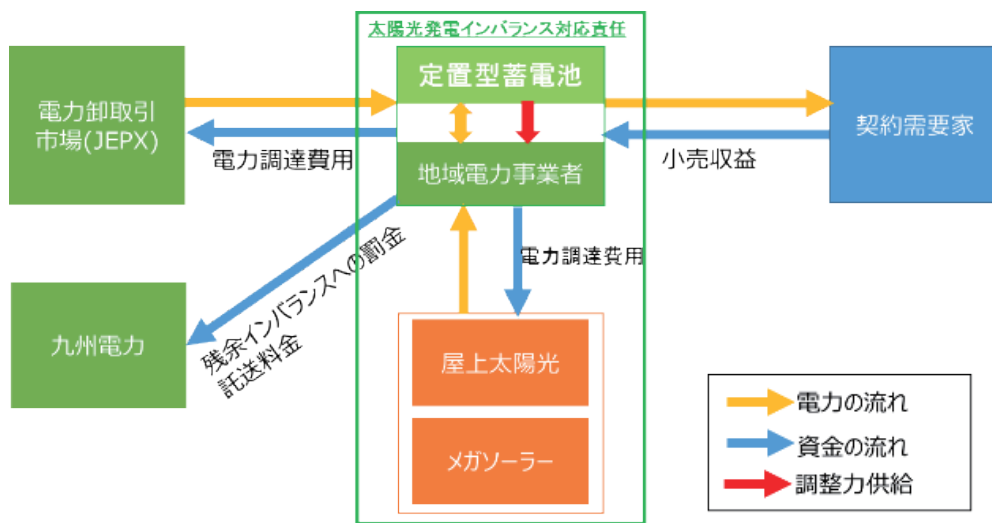
3. 定置型蓄電池の導入

3.1 定置型蓄電池導入の前提

世界的な再生可能エネルギー電源増加を背景に系統レベルでの使用を想定した大規模な定置型蓄電池の導入が進みつつある。本研究においては、Tesla 社の大規模蓄電システムパッケージである Powerpack の価格情報を参考に、参照価格として蓄電池本体価格を 50,000[円/kWh]、インバータ価格を 25,000[円/kW]として計算している。これらのシステム初期投資費用は 6 年間の減価償却期間を想定して定額法により減価償却がなされると仮定し、1 年当たりのコストを決定する。

3.2 定置型蓄電池導入効果算定モデルの構築

図 7 に定置型蓄電池を導入した地域電力事業者のモデルを示す。



蓄電池の利用法は、太陽光発電の予測出力を前提とした電力調達計画の制約とインバータ出力容量(kW)面と蓄電容量(kWh)の面での制約を課したインバランス対応余力の制約の両面を考慮した運用が成される。以下、導入する蓄電システムの kWh: kW 比を放電持続時間と呼ぶ。

次に、定置型蓄電池の性能に関する制約式を説明する。

はじめに、式(3-1)、式(3-2)に蓄電池の充放電容量の上下限に関する制約を定義する。

$$BT_{out}(t) \leq BT_{out}^{max} \times BIN_{OUT}(t) \quad (3-1)$$

$$BT_{in}(t) \leq BT_{in}^{max} \times (1 - BIN_{OUT}(t)) \quad (3-2)$$

ここで、蓄電池の動作状況を表すバイナリ変数¹⁾ $BIN_{OUT}(t)$ を用いて入出力が同時に発生するような矛盾した状況が発生することを防いでいる。 $BT_{in}(t)$ 、 $BT_{out}(t)$ は各時の蓄電池の充電量、放电量である。 $BT_{in}(t)$ 、 $BT_{out}(t)$ の何れかは必ずゼロとなっていることが式(3-1)、式(3-2)から分かる。

¹⁾ 0 か 1 の 2 値しかとらない変数。

次に、太陽光発電の予測誤差が生じた際のインバランスを補償する際に kW 面でどれほどの余力 $DX_{BT}(t,S)$ を持つかを定義した制約式である式(3-3)、式(3-4)を以下に示す。

$$DX_{BT}(t,S) \leq BT_{in}^{max} + BT_{out}(t) - BT_{in}(t) \quad (S = 1,2,3) \quad (3-3)$$

$$DX_{BT}(t,S) \leq BT_{out}^{max} - BT_{out}(t) + BT_{in}(t) \quad (S = 4,5,6) \quad (3-4)$$

式(3-3)は太陽光発電が予測より多く発電してしまう誤差を充電により吸収する際の kW 面での制約式であり、式(3-4)は太陽光発電が予測より少なく発電してしまう誤差を放電により吸収する際の kW 面での制約式である。ここで、S は図 2 に示した太陽光発電の予測誤差分布の確率区分である。

次に、定置型蓄電池に蓄電されている蓄電量(State-of-Charge)SoC(t)の上下限を式(3-5)で定義する。

$$SoC^{min} \leq SoC(t) \leq SoC^{max} \quad (3-5)$$

本節の検証では、上下限は実際の導入 kWh 容量の 90%を上限、10%を下限として考えている。不可侵部分は必要以上に蓄電池を消耗させないために設けられたバッファであると想定している。

次に、蓄電量の推移に関する制約式を式(3-6)のように定義する。

$$SoC(t) = SoC(t-1) + BT_{in}(t) \times EFF_{BT} - \frac{BT_{out}(t)}{EFF_{BT}} \quad (3-6)$$

この式では、1 スロット前の蓄電量と充放電に対する現在の蓄電量の関係を示している。蓄電池の充放電効率 EFF_{BT} は 95%として計算を行っている。

次に、式(3-7)、式(3-8)によって太陽光発電の予測誤差に関するインバランスが生じた際に蓄電池による補償可能量を算定するための kWh 面に関する制約式を定義している。

$$0 \leq SoC^{max} - \left\{ SoC(t) + \sum_{t'=t-T_r+1}^t DX_{BT}(t',S) \right\} \quad (S = 1,2,3) \quad (3-7)$$

$$0 \leq \left\{ SoC(t) - \sum_{t'=t-T_r+1}^t DX_{BT}(t',S) \right\} - SoC^{min} \quad (S = 4,5,6) \quad (3-8)$$

kWh 面においては予測誤差傾向の持続性が影響をもたらすため、用いる予測手法や、その地域の特性に応じて異なった設定が必要になると想定される。上式では、Σ部分において異時点間の誤差傾向の持続要素を組み込んでおり、 T_r を持続時間としている。本研究では持続時間は 2 時間区分としている。

最後に、各確率区分における残存インバランス量 $IB(t,S)$ に関する制約式を式(3-9)に示している。

$$IB(t,S) = O_{PV}(t,S) - DX_{BT}(t,S) \quad (3-9)$$

ここで、 $O_{PV}(t,S)$ は元々のインバランス量である。

3.3 評価方法の定義

計算結果の評価方法を定めるため、合理的導入量と経済的残存インバランス率という指標を定義する。定置型蓄電池の導入量の変化によって、変動利益は図 8 に示すような曲線を描く。経済合理的な事業者は変動利益が最大となる容量の蓄電池を導入することとなるため、この導入量を合理的導入量と呼ぶ。また、導入量の変化に応じた残存インバランス量は図 9 のようなカーブを描く。

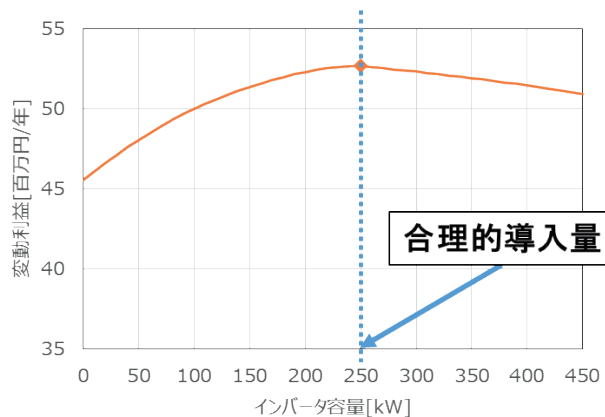


図 8 合理的導入量の定義

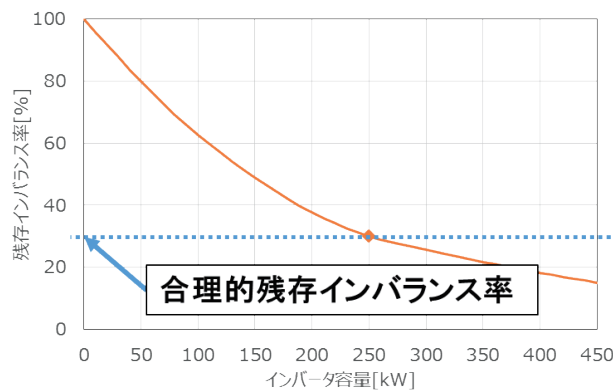


図 9 合理的残存インバランス率の定義

合理的導入量における残存インバランス率のことを以後合理的残存インバランス率と呼ぶ。本研究の目的である、経済合理性を持ちつつ責任ある運用を行うという事業者の行動の評価指標として合理的残存インバランス率を提案し、本研究の目的を合理的残存インバランス率をどこまで低下させることが可能であるのかという問題に還元する。

3.4 計算結果と考察

はじめに、蓄電システムの導入コストの減少が合理的残存インバランス率に及ぼす影響について分析する。蓄電システムの導入コストは急速に低下しつつあるため、前述した参照価格の 100%~70% の価格となった際の合理的残存インバランス率を比較検討してその影響を検討する。太陽光発電の誤差については平均二乗誤差を 10% に固定して計算を行う。計算結果は図 10 に示したようなものとなった。

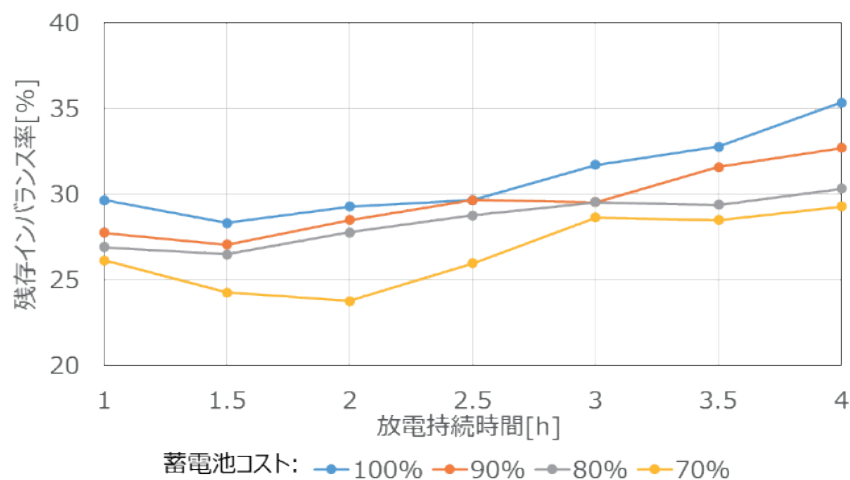


図 10 蓄電池コストと合理的残存インバランス率

参照価格における最小の合理的残存インバランス率は放電持続時間 1.5[h]における 28.3%であるが、90, 80, 70%と蓄電システム導入コストが低下していくにつれて 27.0, 26.4, 23.7%と合理的残存インバランス率は低下していくことが分かる。しかしながら、蓄電池の合理的な導入のみでは期待インバランス量の四分の一程度はインバランスが残ってしまうことが分かる。また、蓄電システムの導入コストに関しては地域電力事業者から見ると外部的要因であり、自身で操作できるわけではない。地域電力事業者による主体的な合理的残存インバランス削減行動の可能性の一つとして挙げられるのが太陽光発電の予測精度の改善である。

平均二乗誤差を 10% から 8, 6, 4, 2% と低減させることができた場合の合理的残存インバランス率を図 11 に示す。予測精度の改善に伴い、およそ RMSE(Root Mean Square Error)×3 程度の合理的残存インバランス率へと改善が可能であることが分かる。しかしながら、地域電力事業者の特徴の一つである局所性を考慮すると、広域の予測において予測精度の改善に貢献する「ならし効果」などが期待できないことなど、広域にわたり再生可能エネルギー資源を保有する事業者と比較して困難な点があることには留意する必要がある。

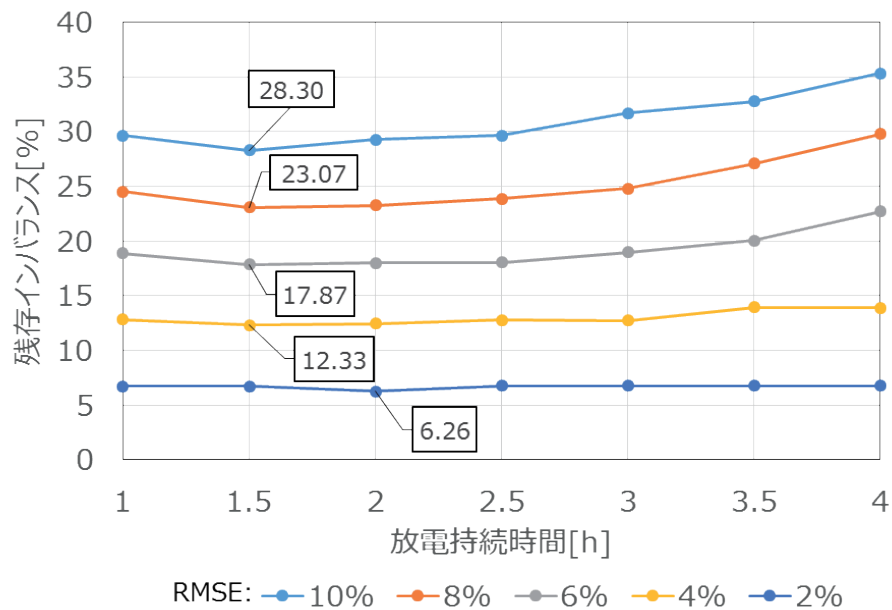


図 11 予測精度の改善効果

4. 定置型蓄電池+V2H 統合システムの導入

4.1 V2H システムの前提

合理的残存インバランス率の削減を目標として定置型蓄電池を導入することに関して、地域電力事業者がより主体的に取り組むことのできる対策として、将来の電気自動車(EV)の普及を視野に入れ、需要家の保有する EV を効果的に利用する方法を本章にて提案していく。EV の利用に関しては主に Vehicle-to-Grid(V2G)や Vehicle-to-Home(V2H)等の運用法が研究されているが、本研究では V2H に着目して分析を行う。その理由としては、前節の定置型蓄電池の導入に際しては地域電力事業者が投資負担を行っているのに対し、V2G 等の系統志向の技術導入においては事業者側でさらなる投資が必要となり、インバランス削減という単一の目標に対して大きな投資リスクを引き受けることに繋がる一方、V2H は主に導入世帯のインセンティブで導入されるが故に、主な投資負担を事業者側で負担する必要がなく、低リスクでインバランス削減への応用可能な資源を得られると予想されることが挙げられる。通常の V2H においては、主に Time-of-Use(ToU)価格²⁾等の時変小売料金などを活用し、EV 車載蓄電池を調達コスト最小化の目的で運用すると想定される。本研究における提案 V2H システムとは、これらの通常の V2H で事前に計画された運用に際して、地域電力事業者内で生じたインバランスに対応するというオプションな動作方法を提供し、そのインバランス対応の貢献に対して事業者が提案 V2H システム導入世帯に報酬を支払うというシステムである。

²⁾ 時間帯別料金。

4.2 統合システムの構築

本節における計算過程は 3 段階に分かれている。

はじめに、第 1 段階として一部の需要家に通常の V2H システムが導入されていると仮定し、需要家側の調達コスト最小化の計算を行い、V2H システムによる需要カーブの変化と、インバランス補償対応可能量の算定を行う。この際、EV の車載蓄電池の動作に関しては State-of-Charge(SoC) に対して一定の最低閾値を設け、それ以上の SoC の領域に関して前章の定置型蓄電池と同様の制約式の下で運用を行うと仮定している。各 EV は蓄電容量 40kWh、充放電出力 3kW、最低閾値 80%と設定して、分析の簡明のため全て同じ動作をすると仮定する。提案 V2H システム導入世帯数に関しては、本研究で考察している低圧契約需要家の全世帯の 3~9%である 50, 100, 150 世帯を想定して計算する。

次に、第 2 段階として、第 1 段階で計算された需要カーブの変化を踏まえて前章と同様の事業者利益最大化の計算を行う。この際、前章での考察で示した通り、残余インバランスが発生する。

最後に、第 3 段階として、第 1 段階で計算されたインバランス補償対応可能容量を残余インバランスに割り当てる。割り当てたインバランス補償量の期待値を計算し、提案 V2H システム導入需要家への報酬額と対処しきれない残余インバランスについて計算を行う。ここで、報酬額は 3[円/kWh]とする。

4.3 計算結果と考察

上記の設定における計算の結果を合理的残存インバランス量の側面から分析した結果が図 12 である。ここで、Case.1 はインバランス対応設備未導入の参照ケースにおけるインバランスであり、Case.2 は定置型蓄電池の合理的残存インバランス、Case.3 が提案 V2H システムと定置型蓄電池の統合システムにおける計算結果である。

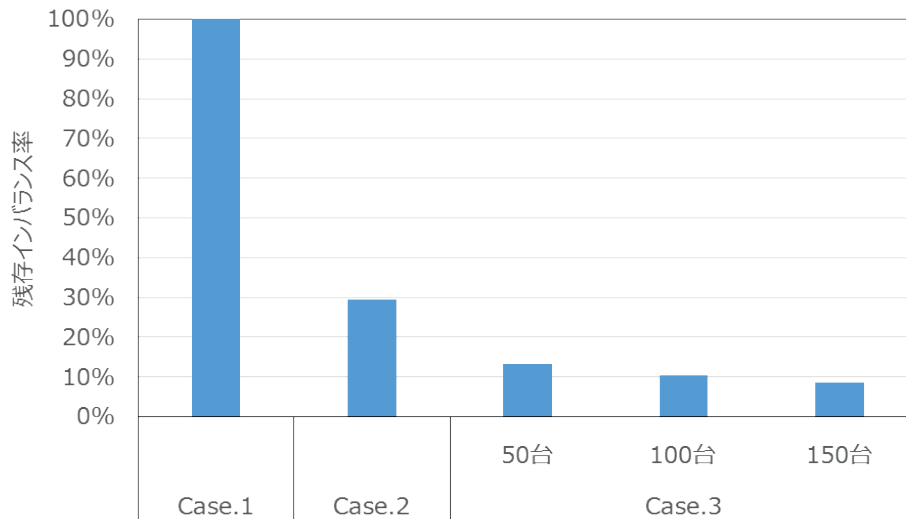


図 12 合理的残存インバランス率の変化

この計算結果から、全低圧契約世帯の 3%である 50 台が提案 V2H システムを導入すると、合理的残存インバランス率は 13.2%まで削減される。これは、定置型蓄電池のみを導入することを想定した場合、予測誤差の RMSE を 10%から 4%に低減することに匹敵する効果であり、本システムの合理的残存インバランス削減という観点での有効性を示している。

さらに、上記の結果について事業者の変動利益に着目すると図 13 のような結果となっている。

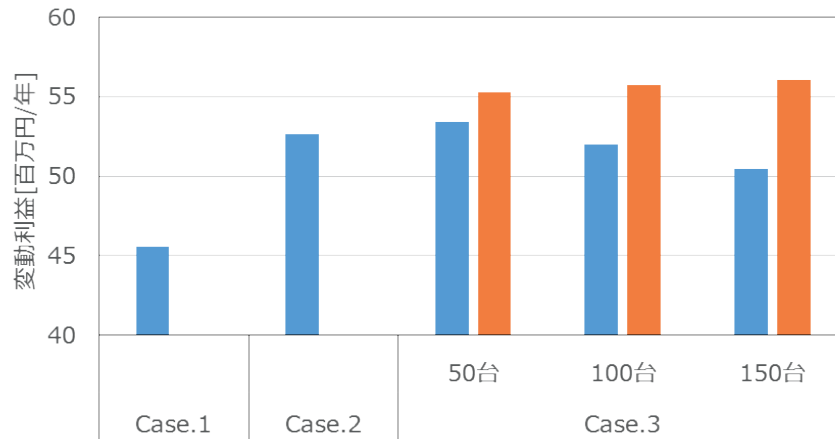


図 13 変動利益の変化

青軸に関しては実際の変動利益の推移であり、赤軸に関しては、変動利益を Case.2 時の変動利益とインバランス削減益とインバランス補償報酬と小売の効率化による損失に分解し、そのうち提案 V2H システムでない通常の需要効率化を行う V2H システムの導入によっても生じてしまう小売の効率化による損失を除いた部分を示した補正変動利益である。補正変動利益は事業者が提案 V2H システムを導入することの効果を直接に示す指標として用いることができ、実際に提案統合システムの導入により補正後利益が増加することが見て取れる。これより、本質的な利益を損なうことなく前述の合理的インバランス削減率の低下を達成していることが分かり、本提案システムの有効性が示されている。

5. まとめ

本書では、新電力事業者の一角を占める地域電力事業者の運営上想定される需給調整面における困難に着目し、蓄電資源の導入による問題解決の可能性を検討した。

はじめに、地域電力事業者のモデルを構築し、地域電力事業者の収益費用構造を算定した。次に、そのモデルに基づいて、定置型蓄電池の導入モデルを設計した。定置型蓄電池の導入に際して、合理的導入量と合理的残存インバランス率という指標を設け、合理的残存インバランス率がどの程度低減可能かという観点からその導入効果についての検討を行った。検討の結果、現状で期待される予測精度において、定置型蓄電池の合理的な導入のみでは 25%~30%程度の合理的残存インバランスが生じることが分かった。

最後に、定置型蓄電池に加えて電気自動車を活用する V2H システムにインバランス補償動作を付け加えた提案システムを導入したモデルを設計し、そのモデルに基づいた計算を行った結果、全低圧契約世帯の 3%である 50 世帯が提案 V2H システムを導入する場合には、事業者の本質的な利益を損なうことなく合理的残存インバランス率を 13.2%まで低減できることが示された。これは定置型蓄電池のみを導入するモデルにおいて予測精度を RMSE=4%程度の水準まで低下させることに匹敵する効果である。これらの結果により、本提案の有効性が示され、地域電力事業者の運営に関する重要な示唆が得られた。

6. 政策立案のための提案

本書で述べたように、再生可能電源の出力予測の誤差に基づくインバランスの補償は、今後の電力システムの安定性を維持するために重要な問題である。また、地域電力事業者の勃興については、単なる電力システムの問題ではなく、地方創生という日本の政策の根幹に関わる重要課題であり、これをさらに活性化させることは地方の経済の活性化、雇用の確保のためにも必要である。

また、本書で定量的に分析したように、定置型蓄電池や電気自動車を有効に利用することにより、地域電力事業者が自ら再生可能電源の出力予測の誤差に基づくインバランスを補償することは可能であり、これにより、地域電力事業の活性化と電力システムの安定化の双方に資することができる。

そこで、エネルギー・環境政策としては、このような地域電力事業者の自律的イノベーションを支援するための技術開発予算の確保が求められる。また、多くの地域電力事業者は地方自治体が母体となっており、資本金規模が小さい。そこで、これらの事業者が蓄電池や電気自動車を導入する場合のファイナンス面の支援やソフト面の支援等も必要である。

参考文献

- [1] 松井英章, “電力自由化と地域エネルギー事業 ―ドイツの先行事例に学ぶ―”, JRI レビュー, Vol.9, No.10, pp.20-29, 2013.
- [2] M. Engelken et al., “Transforming the energy system: Why municipalities strive for energy self-sufficiency”, Energy Policy, vol.98, pp.365-377, 2016.
- [3] 高橋雅仁, 松橋隆治, “重回帰分析を用いた系統エリア大の風力発電・太陽光発電の出力予測と予測誤差特性の分析”, エネルギー資源学会論文誌, Vol.38, No.5, 2017.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術普及編

地域電力事業者の運用改善のための
蓄電資源導入に関する研究

平成 30 年 3 月

**Research on Introduction of Storage Facilities
for Improving Operation of Local Power Companies**
Strategy for Technology Dissemination,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2018.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 研究補助員 濱田 朋宏 (Tomohiro HAMADA)
研究統括 松橋 隆治 (Ryuji MATSUHASHI)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4 階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2018 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
