

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

電力システムの調整力としての
SOFC の利用可能性についての分析

令和 2 年 3 月

An Analysis on Utilizing SOFC to Provide Reserve Capability
for Power Systems

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-FY2019-PP-11

概要

本提案書では、調整力の不足が深刻な課題となっている状況に鑑み、燃料電池、特に SOFC による調整力提供の可能性を分析した。本分析のために、まず、九州電力管内の全ての発電所を含み、太陽光発電の出力予測誤差を考慮した確率的起動停止計画モデルを開発した。

この確率的起動停止計画モデルを用い、需給調整における調整力価格を推定した。次に、SOFC を搭載した一般家庭のエネルギーコスト最小化のモデルを開発し、実際の需要データに対する SOFC の最適運転パターンを導出した。そして、確率的起動停止計画モデルで推定した調整力の上げ代価格を SOFC 搭載家庭モデルに代入し、上げ代調整力提供の報酬がある場合とない場合の最適運転パターンの相違を明らかにした。その結果、特に調整力報酬があることで、SOFC の最適運転パターンが変化し、上げ代を提供できることが分かった。本分析の結果より、SOFC による調整力提供は有望であり、近い将来に実現する可能性がある。

政策面への提案としては、行政が主導して、本提案書での解析結果に関する実証実験を行うことが挙げられる。例えば、太陽光発電 (PV) の予測誤差に基づくインバランスを補償するシステムを考える場合、実地域の気象データと PV の予測、実測データを元にして、遠隔操作可能な SOFC との組み合わせによる実証実験を行う必要がある。これにより、その後他地域で収益性のあるビジネスモデルをいかにして確立できるかが明らかとなり、脱炭素社会に向けたイノベーション活性化につながることを期待できる。

Summary

This paper aims at analyzing potentials for SOFC to provide reserve capabilities. For this analysis, we first developed a model of stochastic unit commitment planning including all power generation plants in Kyushu electric utilities, taking errors in projecting photovoltaic outputs. Prices of reserve capabilities were estimated, using the above stochastic unit commitment planning model. Next we developed a model to minimize energy cost for households with SOFC. Then the prices of upward reserve capabilities were used to clarify the difference between optimal operation patterns with and without revenues for providing the reserve capabilities. It was concluded that the optimal operation pattern of SOFC was modified by the revenue and that the upward reserve capability could be provided. The results of this analysis revealed that the provision of reserve capability by SOFC is promising, and that it could be socially implemented in near future.

As a policy proposal, social experiments based on the analytic results of this document are recommended. If we take the system compensating imbalances resulting from forecast errors in photovoltaic outputs into consideration, we need to perform the social experiments to combine aggregated SOFCs, which we could remotely control, with aggregated roof-top PVs, on which we have the weather forecast information and actual PV outputs. The social experiments will clarify how we could establish profitable business models in other regions, and activate innovations for realizing decarbonized societies.

目次

概要

1. はじめに 1

2. エネルギー貯蔵と調整力の必要性とその用途 2

 2.1 需給調整市場における調整力の分類とその概要 2

 2.2 三次調整力の提供と燃料電池の利用可能性 3

3. SOFC の調整力提供可能性を分析するためのモデル開発と前提条件 4

 3.1 一般電気事業者を想定した系統全体の起動停止計画モデル① 4

 3.2 SOFC を搭載した住宅の電力システムモデル② 5

4. SOFC の調整力提供可能性に関する分析結果 5

5. 本提案書の結論 9

6. 政策立案のための提案 10

参考文献 10

1. はじめに

2015 年 11 月 30 日から 12 月 13 日までフランスのパリで開催された第 21 回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において、いわゆる「パリ協定」（Paris Agreement）が採択された。パリ協定は、2020 年以降の温室効果ガス排出削減の新たな国際枠組みであり、歴史上初めて全ての国が受け身でなく自発的な排出削減に参加する公平な合意であるといわれている。このパリ協定以降、既に 4 年近くが経過しているが、この間、気候変動に対する世界的な認識はさらに高まるとともに、対応はより性急になりつつある。2019 年 9 月 9 日から 9 月 12 日まで UAE のアブダビで開催された第 24 回世界エネルギー会議では、エネルギーの脱炭素化が世界全体の傾向として強く認識される大会となった[1]。著者も本会議に出席したが、そこでは、欧州諸国のみならず、中東産油国のエネルギー大臣やアジア、アフリカ諸国も脱炭素化を目指す必要性を訴えていた。

一方、安倍総理を本部長とする地球温暖化対策推進本部では、2016 年 5 月に地球温暖化対策計画を閣議決定し、2030 年度に 2013 年度比で 26.0%の温室効果ガス削減とともに、2050 年には 80%の温室効果ガス削減を目指すとしている。さらに、2019 年 6 月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を閣議決定し、地球温暖化対策を経済成長のための戦略として位置付けることを示している。これは、上述した世界の潮流を踏まえたものと考えられる。

世界各国の温室効果ガス削減目標を見ても、特に 2050 年の温室効果ガスの削減率が非常に高く設定されている。この背景には、気候変動対応策に対する意識の高まりだけではなく、再生可能電源、特に太陽光発電と風力発電のコスト低下に伴う大量導入があると考えられる。エネルギーシステムの中でも、特に電力部門における再生可能エネルギーの増加が特筆される。上述した温室効果ガス削減の目標値を念頭に置くと、2050 年の電力部門の kWh 当たりの CO₂ 原単位としては 0 に近い非常に低い値を実現する必要がある。これは技術的にも経済的にも困難な目標であり、そこに挑戦していく必要があることを意味する。

このような目標を達成するためには、2050 年以降の電力システムにおいては、再生可能電源および原子力発電等のシェアが大部分を占める必要がある。また、再生可能電源の中でも、経済性およびエネルギー賦存量の点から風力発電と太陽光発電が主要な位置を占める可能性が高い。風力発電と太陽光発電は気象条件によって出力が変動する電源であり、その変動吸収は必須となる。これは、前日の起動停止計画において想定した出力の予測値が実際値とずれることによって生じる誤差の補償のための上げ代、下げ代の提供から、短い時間の変動を吸収する周波数調整まで多岐にわたるが、本質的には電力量の需要と供給を合わせるための調整力が重要になることを意味する。このような調整力は、現状では主として火力発電によって提供されている。例えば、太陽光発電の出力予測の誤差に対しては、複数の火力発電所を部分負荷で並列運転しておき、出力予測が上方向、あるいは下方向にずれた場合に、部分負荷運転していた火力発電の出力を下げる、あるいは上げることによって、予測誤差による需給のずれを補償するわけである[2]。仮に、2050 年に電力システムの大部分を原子力発電と変動性の再生可能電源で占めた場合には、調整力を提供してきた火力発電が稼働する余地が極めて小さくなる可能性がある。その場合に、蓄電池、水素等によるエネルギー貯蔵関連技術を利用して、調整力を提供することは極めて重要と考えられる。

また、脱炭素化のために再生可能電源が大量導入された電力システムでは、上述した調整力の必要性および系統安定性維持の観点から、大量の出力抑制が必要となる可能性が高い。この抑制部分をエネルギー貯蔵技術により、貯蔵することも考えられる。次に、この貯蔵されたエネルギーを電気エネルギーとして、あるいは電気エネルギー以外のエネルギーとして用いることが考えられる。

さらに、太陽光発電は同期発電機による発電と異なり、回転機としての慣性を持っていないた

め、その容量増加に伴い、電力システムの安定性が低くなることが分かっている。詳細は文献[3] にゆずるが、太陽光発電を大量に導入することによって系統の同期発電機の割合が減少し、地絡事故等が起きたときの系統遮断までの許容時間が短くなってしまうという問題が生じる。すなわち、交流の電力システムの系統安定性を維持するには、慣性を持つ同期発電機による発電の割合も一定以上に保たなければならない。しかし、火力発電の割合を増加させると、系統の安定性が保たれても、同時に単位発電量当たりの CO₂ の排出量が増加してしまう。そこで、VSG（Virtual System Generator）とよばれる技術システムによる方法もある。これは、太陽光発電と蓄電池およびインバータからなるシステムを制御することにより、同期発電機のようにふるまわせ、疑似的に慣性を持たせることにより、交流系統の安定化に資するものである。これにも、エネルギー貯蔵技術としての蓄電池が必要である。

これらの状況を総合的に考えると、将来の電力システムの脱炭素化において、エネルギー貯蔵技術および調整力の提供は極めて重要であることが分かる。

2. エネルギー貯蔵と調整力の必要性和その用途

2.1 需給調整市場における調整力の分類とその概要

電力システムにおいては、早い時間帯から遅い時間帯に至るまで、あらゆる時間スケールで需要と供給のバランスを取る必要がある。これを図1に示す[4]。1章で述べたように、太陽光発電や風力発電など変動性の再生可能電源の大量導入に伴い、特に右側に示す早い時間帯における需給のバランスを取ることが難しくなっている。さらにこれまで調整力の中心を担ってきた火力の稼働量が小さくならざるを得ないことから、外部から調整力を調達する必要性が高くなってきている。そこで、現在審議されている需給調整市場の概要を以下にみていくことにする。

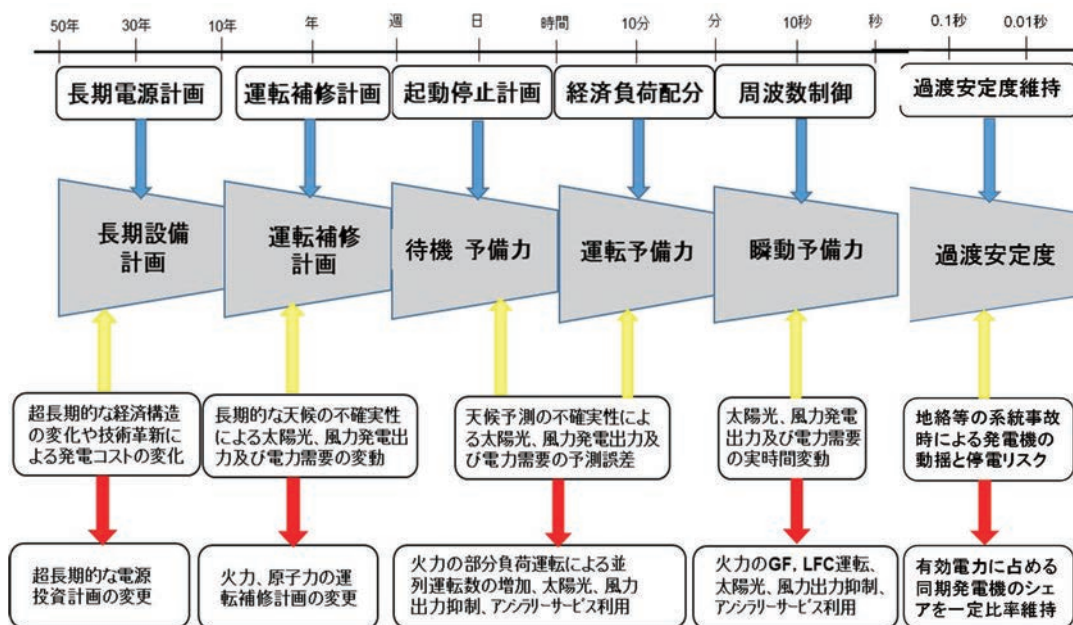


図1 電力システムにおける各時間帯での需給バランスと調整力の必要性[4]

図 2 は、現在電力広域的運営推進機関（OCCTO）において審議されている需給調整市場における各調整力の概要と必要条件を示している[5]。一次調整力、二次調整力①、二次調整力②、三次調整力①、三次調整力②の順に、応動時間の速い方から、遅い方に向かった調整力が定義されている。例えば、負荷周波数制御といわれるのは図 2 の中で、二次調整力①に区分されているものである。一方、経済負荷配分制御といわれるのは、二次調整力②もしくは三次調整力①に区分されているものである。このように再生可能電源の大量導入に伴い、調整力の不足が懸念される区分について、2021 年度から順次運用が開始される需給調整市場で調整力が調達される予定となっている。これら外部から調達が期待されている調整力区分はいずれもその不足が懸念されているものである。ここでは、そのうち、比較的ゆっくりとした調整力である三次調整力①および②に着目し、SOFC などの燃料電池による調整力提供可能性について分析を進める。

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve for FIT (RR-FIT)
指令・制御	オフライン (自端制御)	オンライン (LFC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン
監視	オンライン (一部オフラインも可 ^{※2})	オンライン	オンライン	オンライン	専用線：オンライン 簡易指令システム：オフライン
回線	専用線 ^{※1} (監視がオフラインの場合は不要)	専用線 ^{※1}	専用線 ^{※1}	専用線 ^{※1}	専用線 または 簡易指令システム
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内 ^{※3}	45分以内
継続時間	5分以上 ^{※3}	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	— (自端制御)	0.5～数十秒 ^{※4}	1～数分 ^{※4}	1～数分 ^{※4}	30分
監視間隔	1～数秒 ^{※2}	1～5秒程度 ^{※4}	1～5秒程度 ^{※4}	1～5秒程度 ^{※4}	1～30分 ^{※5}
供出可能量 (入札量上限)	10秒以内に 出力変化可能な量 (機器性能上のGF幅 を上限)	5分以内に 出力変化可能な量 (機器性能上のLFC幅 を上限)	5分以内に 出力変化可能な量 (オンラインで調整可能 な幅を上限)	15分以内に 出力変化可能な量 (オンラインで調整可能 な幅を上限)	45分以内に 出力変化可能な量 (オンライン(簡易指令 システムも含む)で調整 可能な幅を上限)
最低入札量	5MW (監視がオフラインの場合は1MW)	5MW ^{※1,4}	5MW ^{※1,4}	5MW ^{※1,4}	専用線：5MW 簡易指令システム：1MW
刻み幅 (入札単位)	1kW	1kW	1kW	1kW	1kW
上げ下げ区分	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ

※1 簡易指令システムと中給システムの接続可否について、サイバーセキュリティの観点から固めて検討中のため、これを踏まえて改めて検討。
※2 事後に数値データを提供する必要あり (データの取得方法、提供方法等については今後検討)。
※3 中給システムはエリア固有事情を踏まえて個別に設定。
※4 中給システムと簡易指令システムの接続が可能となった場合においても、監視の通信プロトコルや監視間隔等については、別途検討が必要。
※5 30分を最大として、事業者が収集している周期と合わせることも許容。

図 2 需給調整市場における各調整力の概要と必要条件[5]

2.2 三次調整力の提供と燃料電池の利用可能性

ここでは、三次調整力①、三次調整力②の区分における調整力を提供する技術システムの候補について説明する。1 章で述べたように、再生可能電源の大量導入に伴い、この区分における調整力も不足しつつある。本区分で調整力を提供する技術システムの候補を以下に挙げる。

例えば、広域の電力システムに組み込まれず、特定の工場や事業者内で電力を提供してきた自家発電やコージェネレーション関連設備は、発電技術としては、ガスエンジン、ガスタービン、ディーゼルエンジンなどによる火力発電が主であり、本区分の調整力提供の候補となりうる。このマクロな検討の例として、小宮山らによるコージェネレーションの可能性を評価した研究がある[6]。また、家庭用に普及してきた SOFC、PEFC など多数台アグリゲートすることにより、調整力を提供し得ると考えられる。燃料電池による本区分の調整力提供を検討したものとして、越智らの分析例がある[7]。一方、家庭用の燃料電池をアグリゲートして調整力を提供する場合は調整力を提供しない場合の稼働状況を知ることが重要である。一般に、家庭用の燃料電池は、当該世帯の電力需要を超えないように運転する場合が多い。これとは別に近年普及が進んでいる SOFC では定格出力で運転し続ける運転方式もある。これは SOFC が高温で作動する材料の耐久性から、起動停止を多数回繰り返すことが製品寿命に悪影響を及ぼすためである。しかし、近年

では、SOFC でも停止させることなく、電力需要に合わせて出力を増減する運転方式が出てきている。電力需要に応じて出力を増減する方式では、日中に部分負荷運転になることが多いため、上げ代調整力を提供することができる。逆に、定格運転をしている燃料電池では、下げ代調整力を提供することができる。このように、家庭用燃料電池は本区分の調整力提供の候補としては有望である。

このような技術とは別に、蓄電池や電気分解による水素の形で、エネルギーを貯蔵することにより、調整力を提供することも考えられる。ただし、蓄電池を用いる場合は、本区分より速い負荷周波数制御、すなわち、二次調整力①への提供を考えた方がよいとする見解もある。

3. SOFC の調整力提供可能性を分析するためのモデル開発と前提条件

本章では、SOFC の調整力提供可能性を分析するためのモデル開発とその概要について述べる。まず、この目的のために、一般電気事業者を想定した系統全体の電力システムモデル①と、SOFC を搭載した住宅の電力システムモデル②の二種類を開発した。そして、モデル①における最適解のシャドウプライスを用いて、2 章で述べた需給調整市場における三次調整力の上げ代、下げ代の価格を推定した。次に、モデル①で推定した上げ代、下げ代の価格を元に、モデル②において、家庭用の SOFC をアグリゲートして需給調整市場の三次調整力区分に参加した場合の貢献可能性を評価した。

3.1 一般電気事業者を想定した系統全体の起動停止計画モデル①

混合整数線形計画法に基づく起動停止計画モデルについて解説する。起動停止計画とは、前日に翌日の電力需要の予測値や再生可能電源の出力予測値に基づいて、安定した電力システムを維持するとともに運用コストを最小化する最適化問題によって、発電設備の起動停止スケジュールを決定するものである。

まず、本モデルでは、時間の分解能を 1 時間とし、3 種類（夏期・冬期・中間期）の季節、2 種類（平日・休日）の曜日、3 種類（大・中・小）の日射量の組み合わせによる代表日を設定することにより、九州地域の年間を通した電力システムの発電単価、CO₂ 排出量、太陽光発電の抑制量、および市場からの調整力の調達量を最適化により求める。これらの前提条件に必要となる情報として、九州電力の電源構成、2017 年 2 月、5 月、8 月の一般社団法人日本卸電力取引所（JEPX）の実績値、太陽光発電、風力発電の発電データおよび予測誤差の分析結果[8]に基づき、データを収集・整理し、上記モデル①の入力データとした。

混合整数線形計画による最適化モデルの目的関数は(1)式のように設定している。(1)式において、 u は起動停止ベクトル（バイナリ変数）、 U は起動停止の可能領域、 c は 起動コスト、 ξ は、想定シナリオ（→本提案書においては PV の出力変化シナリオ）、 $Prob_{\xi}$:シナリオ ξ の生起確率、 F は燃料費関数を意味する。主な変数としては、九州電力管内の全ての発電所の起動停止スケジュール、各発電機の各時間帯における出力、再生可能エネルギーの出力抑制量などであり、主な制約条件としては、各時間帯の需給制約、各発電設備の負荷と発電効率の関係、各発電設備出力の上下限制約および時間当たりの負荷変動率の上下限などが挙げられる。

$$\text{目的関数} \quad \min_{u \in U} [c^T u + \sum_{\xi} \{Prob_{\xi} \cdot F(u, \xi)\}] \quad (1)$$

起動停止計画モデルの開発に当たり、外部からの調整力については、需給調整市場が開かれ、そこに SOFC や自家発電設備などの資源が参入し、調整力のみを提供できる状況を想定する。

また、調整力の必要性については、電力需要の不確実性および太陽光発電、風力発電の予測誤差を定量化し、これを下記のように離散化した。

すなわち、区間 $S[a, b, c, d, e, f] = [-4.1\sigma, -2.1\sigma, -0.8\sigma, +0.8\sigma, +2.1\sigma, +4.1\sigma]$ という確率区分を定め、各確率区分が発生する確率を、 $0 \sim \pm 0.8\sigma$ が各 34.1%、 $\pm 0.8\sigma \sim \pm 2.1\sigma$ が各 13.6%、 $\pm 2.1\sigma \sim \pm 4.1\sigma$ が各 2.1%としている。 σ は既往の文献に基づいて設定する。ここで、確率区分 a, b, c は下げ代、 d, e, f は上げ代としての調整力を必要とする確率区分である。

そして、この起動停止計画モデル①における最適解のシャドウプライスを用いて、2 章で述べた需給調整市場における三次調整力の上げ代、下げ代の価格を推定した。

3.2 SOFC を搭載した住宅の電力システムモデル②

SOFC を搭載した住宅の電力システムモデル②では、30 軒の家庭における実際の電力需要データを用いて、発電のみを行う 700W 出力の SOFC 燃料電池を導入した際の家庭にとって最も経済性の高い運転パターンと、それによる年間の経済メリットを計算した。時間の分解能を 30 分とし、3 種類(夏期・冬期・中間期)の季節、2 種類(平日・休日)の曜日の 6 種類の代表日についての 30 軒の電力需要を入力データとして分析を行うにあたり、家庭の電力需要データ、電気料金等の入力データを設定した。家庭向けの電力価格は、基本料金と従量料金という従来の形式ではなく、現在進展する料金体系の自由化を想定し、基本料金は廃止し、従量料金のみと、27 円/kWh と想定した。また、上げ調整力については、30 分以内に 1kWh を上げる調整に対し、15 円/kWh が報酬として追加されるものと設定した。これは、kWh 発電によって得られるメリット(27 円/kWh 相当の価値)に加えて、家庭が得ることができるものである。

次に、起動停止計画モデル①で推定した上げ代、下げ代の価格を元に、この SOFC 搭載住宅電力モデル②において、家庭用の SOFC をアグリゲートして需給調整市場の三次調整力区分に参加した場合の貢献可能性を評価した。

4. SOFC の調整力提供可能性に関する分析結果

ここでは、まず一般電気事業者を想定した系統全体の起動停止計画モデル①の最適化計算の結果を示す。図 3 および図 4 は、中間期(春秋期)の平日および休日における一日の九州電力管内の各発電所の起動停止および各時間帯での出力の期待値を示している。例えば PV の発電量については、3 章で述べたようにラプラス分布に従い確率的に変動する事象であり、期待値をとったものを示している。

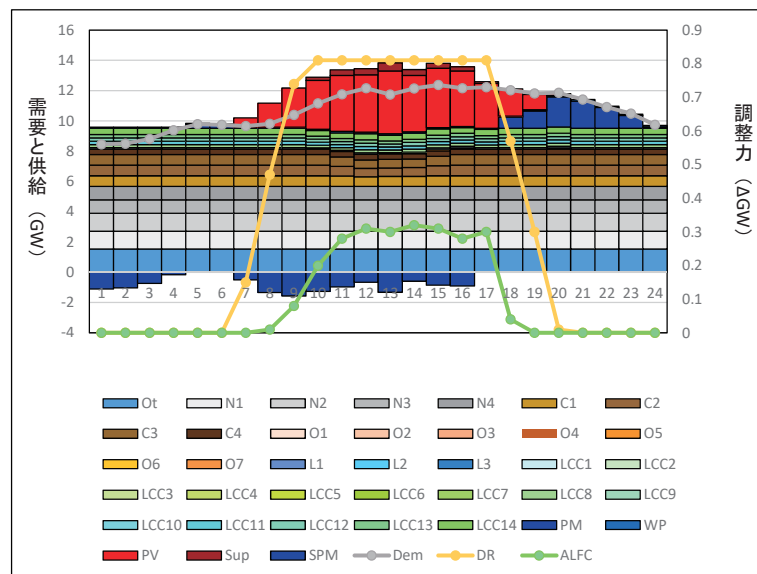


図 3 確率的起動停止計画モデルの最適化結果（中間期平日）

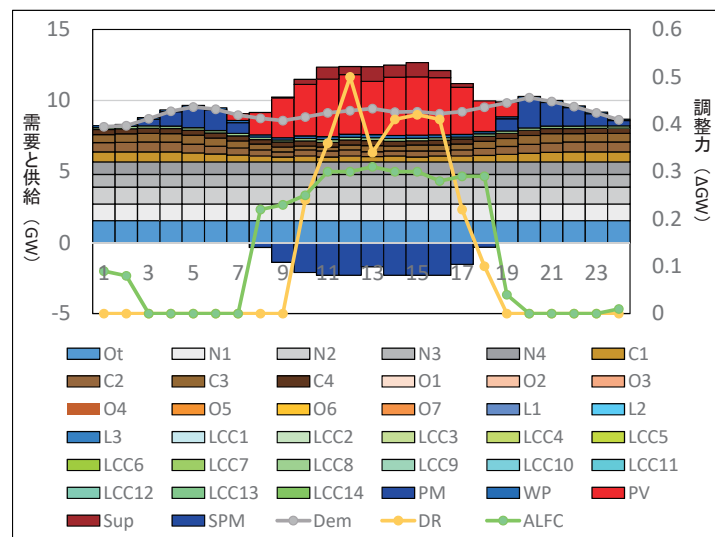


図 4 確率的起動停止計画モデルの最適化結果（中間期休日）

図 3、図 4 の凡例は、九州電力管内において、実際に存在する発電所を示しているものである。上から順に Ot は地熱発電所および流れ込み式水力発電所による発電、N1 から N4 までは 4 基の原子力発電所による発電、C1 から C4 までは 4 基の石炭火力発電所による発電、O1 から O7 までは 7 基の石油火力発電所による発電、L1 から L3 までは 3 基の天然ガス火力発電所による発電、LCC1 から LCC14 までは 14 基の天然ガスコンバインドサイクル火力発電所による発電、PM および SPM は揚水発電所の発電および汲み上げ、WP は風力発電、PV は太陽光発電、SUP は太陽光発電の出力抑制分を指す。また、Dem は九州電力管内における電力需要、DR は外部市場からの調整力の供給量、 ΔLFC は外部市場からの周波数調整力の供給量を指す。

次に、確率的起動停止計画モデルのシャドウプライスを用いた調整力価格の推定結果を示す。まず、図 5 は上げ代価格の推定結果である。図 5 の 6 本のプロット付きの実線は、夏期平日 (SW)、

夏期休日 (SH)、中間期平日 (MW)、中間期休日 (MH)、冬期平日 (WW)、冬期休日 (WH) の各々の一日における上げ代価格の推移を示す。また、赤の実線は、典型的な SOFC 利用世帯の上げ代提供のためのコスト (ガス料金と発電効率に基づき推定した値) を示している。ただし、これはモノジェネレーション (熱を利用せず、電気のみを利用する運転モード) を前提としており、コージェネレーションであれば、上げ代提供コストはさらに低くなる。これらより、モノジェネレーションを前提にしても、赤の実線よりも上げ代調整力価格が上回る季節と時間帯があり、こうした時間帯では調整力提供の経済合理性が認められることになる。

上げ代調整力価格は、主として機会収益の損失時間が長いため、図 6 に示す下げ代と比較して、調整力価格が高くなる。この点について、燃料電池を用いた調整力提供の可能性と合わせて考えると興味深い。すなわち、特に家庭用の燃料電池では、昼間に部分負荷になる可能性が高いため、機会収益の損失はなく、調整力提供ができるはずである。すなわち、家庭用燃料電池の集合運用による上げ代調整力提供は、この点からは有望と考えられる。

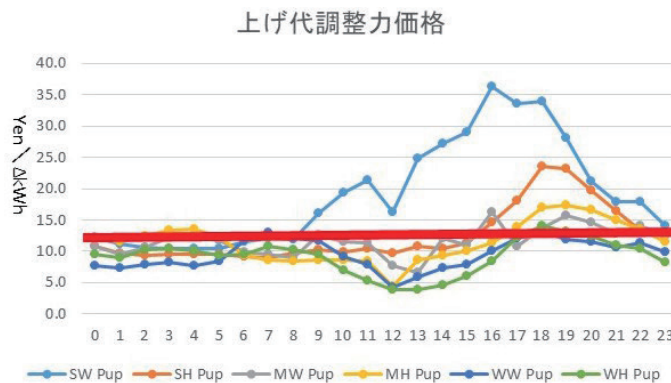


図 5 確率的起動停止計画モデル①による上げ代調整力価格の推定結果

次に、確率的起動停止計画モデル①による下げ代調整力価格の推定結果を図 6 に示す。

図 5 と同様に、6 本のプロット付きの実線は、夏期平日、夏期休日、中間期平日、中間期休日、冬期平日、冬期休日の各々の一日における下げ代価格の推移を示す。また、赤の実線は、典型的な SOFC 利用世帯の下げ代提供のためのコスト (モノジェネレーションモード) を示している。下げ代調整力価格は、図 5 の上げ代と比較して、機会収益の損失時間が短いため、調整力価格が低くなる。また、現在の OCCTO における審議内容から、下げ代調整力が、市場としてオープンになるか否かも微妙な状況となっている。このことから本提案書では、燃料電池による調整力提供に関しては、当面の間、上げ代調整力の方を考えることにする。ただし、2 章で述べたように、SOFC の運転形式として定格で運転し続ける Type S とよばれるものがある。このような運転形式をとる SOFC では、下げ代を提供する可能性もある。これについては、今後の研究課題とする。

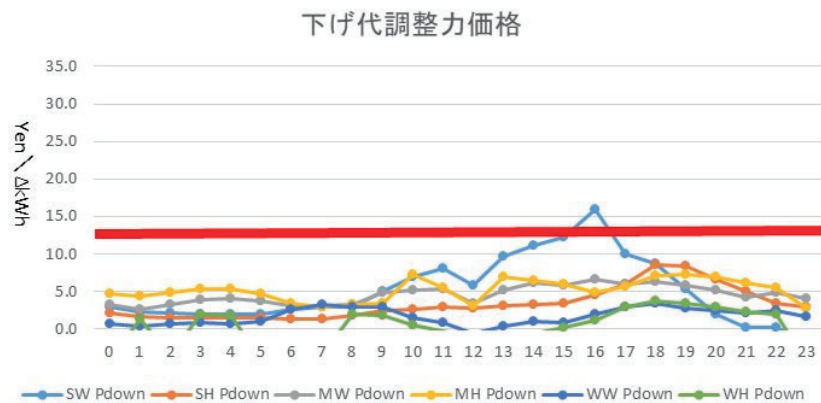


図 6 確率的起動停止計画モデル①による下げ代調整力価格の推定結果

次に、SOFC を搭載した住宅の電力システムモデル②に、図 5 で推定した上げ代調整力価格の推定値を入力し、需給調整市場に参加した場合と参加しなかった場合で、SOFC の運転にどのような差が出るかについて評価した結果を図 7 および図 8 に示す。これらは、3 章で述べた 30 世帯について計算したうちの典型的な世帯として掲載したものであり、他の世帯でも基本的には同様の変化がみられる。

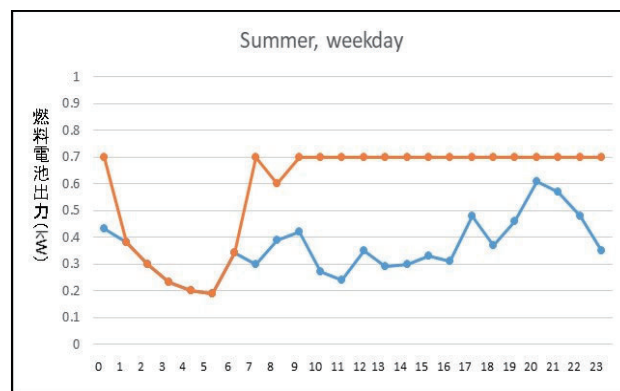


図 7 需給調整市場による上げ代報酬のある場合とない場合の燃料電池稼働の差（夏期平日）

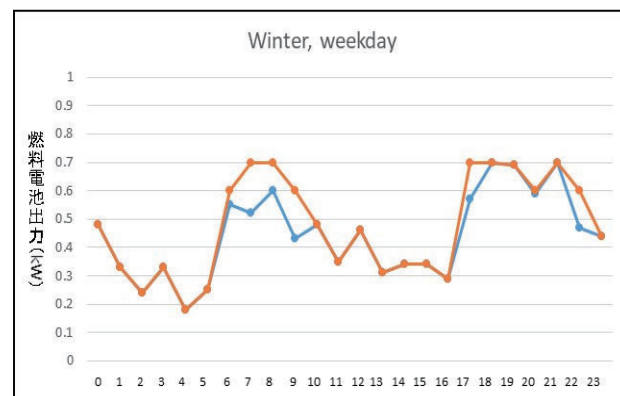


図 8 需給調整市場による上げ代報酬のある場合とない場合の燃料電池稼働の差（冬期平日）

図 7 と図 8 を比較してみると、図 7 の夏期平日の方が、上げ代報酬の有無による SOFC 稼働の差が大きくなっている。この理由は、図 5 において、水色で示した夏期平日の上げ代価格が、赤の実線で示す SOFC の上げ代供給コストより高い時間帯が多いことによる。逆に図 5 中の濃い青色で示した冬期平日では、上げ代価格が SOFC 上げ代供給コストを上回る時間帯が少ない。このことが、夏期平日と冬期平日の SOFC による上げ代供給に影響を及ぼしている。

この調整力提供の第一の目的は、1 章で述べたように、再生可能電源、特に太陽光発電システムの大量導入の際の電力システムの安定性に貢献するためのものである。この点を考慮すると、太陽光発電の出力が高くなる夏期の調整力提供可能性が高いことは望ましいことである。

さらに、このような分析結果に対しては、エネルギー事業者が高い関心をもち、既に著者と複数回の意見交換を行ってきた。事業者としても、ここで検討しているシステムを社会実装する意図がある。また、現在の SOFC の技術的な状況を見ると、既に、複数の家庭用 SOFC を情報通信ネットワークにより遠隔操作することが可能となっている。例えば、台風の影響で、停電が発生した地域では、事前に数千台の SOFC を準備し、電力系統と解列することで、大規模停電が発生した際にもライフラインとしての電力を供給し続けた実績もある。

これらの事象および現在の状況と本分析結果より、SOFC による調整力提供は非常に有望で、近い将来に実現する可能性が高い技術システムであると結論づけることができる。

5. 本提案書の結論

本提案書では、調整力の不足が深刻な課題となっている状況に鑑み、現在普及が進んでいる燃料電池、特に SOFC による調整力提供の可能性を分析した。ケーススタディの対象としては、太陽光発電の増加が特筆される九州地域を選定した。本分析のために、まず、九州電力管内の全ての発電所を含んだ確率的起動停止計画モデルを開発した。旧一般電気事業者は、毎日の電力システム運用のなかで、電力需要の誤差のみならず、太陽光発電の出力の予測誤差を考慮し、誤差があっても停電が起きないように、上げ代、下げ代の供給力を用意している。この状況に鑑み、旧一般電気事業者の現実の運用を再現できる確率的起動停止計画モデルとなっている。

この確率的起動停止計画モデルを用い、需給調整市場が開かれた状況を想定して、調整力価格を推定した。これには、上記最適化モデルのシャドウプライス（調整力の制約式の右辺値の微小変化に対するトータルコスト（目的関数値）の変化の微係数）を用いて、各季節、各時間帯の三次調整力の上げ代価格を推定した。

次に、SOFC を搭載した一般家庭のエネルギーコスト最小化のモデルを開発し、30 世帯の需要データに対する SOFC の最適運転パターンを導出した。そして、確率的起動停止計画モデルで推定した三次調整力の上げ代価格を SOFC 搭載家庭モデルに代入し、上げ代調整力提供の報酬がある場合とない場合の最適運転パターンの相違を明らかにした。その結果、特に調整力報酬があることで、当該価格が高くなる夏期を中心に、SOFC の最適運転パターンが変化し、上げ代を提供する可能性が高いことが定量的に明らかになった。

6. 政策立案のための提案

上記の分析結果に対し、エネルギー事業者も高い関心をもっており、ここで検討しているシステムを社会実装する意思がある。また、現在の SOFC は情報通信ネットワークにより遠隔操作可能である。これらより、SOFC による調整力提供は非常に有望で、近い将来に実現する可能性がある。

したがって、政策面への提案としては、行政が主導して、上記に関する実証実験を行うことが挙げられる。本施策は費用対効果の面からも有望であるが、ビジネスモデルとして成立するには検証すべきことが残されている。例えば、太陽光発電（PV）の予測誤差に基づくインバランスを補償するシステムを考える場合、PV の展開する地域、規模、気象条件のばらつきにより、発生する予測誤差が異なる。それにより、例えば PV 1 万 kW に対し、SOFC 何万 kW をバランシンググループとして組み合わせれば良いかが決まる。これには実地域の気象データと PV の予測、実測データを元にして、遠隔操作可能な SOFC との組み合わせによる実証実験を行う必要がある。これにより、その後地域でビジネスモデルとして展開することにつながり、脱炭素社会に向けたイノベーション活性化にもつながることが期待できる。

参考文献

- [1] エネルギー会議（WORLD ENERGY CONGRESS）, <https://www.worldenergy.org/experiences-events/world-energy-congress>, 2019.10.28 access.
- [2] Eiji Nishiura and Ryuji Matsuhashi, “A study on unit commitment taking uncertainties in forecast of renewable energy outputs into consideration”, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, vol. 8, no. 4, July 2019: pp. 392-396. July 2019. Digital Object Identifier: 10.12720/sgce.8.4.392-396.
- [3] Ryuji Matsuhashi, “Development of Model for Optimal Operation of Power Systems with Large-Scale Integration of Solar Power Generation in Kyushu Region”, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 5, No. 6, November 2017, pp.464-468.
- [4] 松橋隆治, “エネルギーシステムの低炭素化に向けた課題とイノベーション”, 低炭素社会戦略センターシンポジウムパネル討論講演資料, 2017.12.12.
- [5] 電力広域的運営推進機関（OCCTO）, 調整力及び需給バランス評価等に関する委員会事務局, “2020年度向け調整力公募に向けた課題整理について”, 2019年5月23日.
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2019/files/chousei_39_03.pdf, (アクセス日2020.1.2)
- [6] 小宮山涼一, 藤井康正, “再エネ大量導入下でのコージェネレーションシステム(CGS)による上げDR・下げDR 導入可能性分析”, エネルギー資源学会論文誌 2019 年 40 巻 6 号, pp.232-241
- [7] 越智雄輝, 榎原友樹他, “固定価格による買取期間終了後の太陽光発電と固体酸化物形燃料電池を活用したエネルギー需給モデルの構築”, 第 36 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集. 2020.
- [8] 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, 38 巻, 5 号, 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

電力システムの調整力としての SOFC の利用可能性についての分析

令和 2 年 3 月

An Analysis on Utilizing SOFC to Provide Reserve Capability for Power Systems

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2020.3

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 特任研究員 松橋 隆治 (MATSUHASHI Ryuji)
- 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/>

© 2020 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。
