

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

既存電源および電気自動車の活用を考慮した
周波数調整市場の設計とその経済性評価

平成28年3月

**Design and Evaluation of Frequency Regulation Market
Using Conventional Power Plants and Electric Vehicles**

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-FY2015-PP-19

概要

先行する欧米の電気事業に倣い、我が国でも電力自由化が進められている。発送電分離や小売部門自由化と同時に、風力や太陽光といった電源の導入により火力・揚水式水力発電の割合が減少すると、電力系統の適正周波数を保つための負荷周波数制御（Load Frequency Control, LFC）調整力が不足する事態が危惧される。このような問題を踏まえ、本稿では、電力システム改革が進んだ日本における、電力の安定供給を実現するのに十分な LFC 調整力を確保する制度設計として、自由化先行地域を参考にした、周波数調整市場の提案を行う。さらに、需要家側資源として電気自動車（EV）を周波数制御に活用することを検討し、市場から獲得される報酬が、環境低負荷な電気自動車の販売を促進する、インセンティブとなる可能性について分析する。

Summary

Nowadays, technologies on demand response are drawing attention to secure the stability of power systems. In particular, EVs, electric vehicles, are anticipated to contribute to the load frequency control using their batteries through V2G. In the U.S., demand-side resources such as EVs are integrated into ancillary services market to control frequency or secure reserve margin. In this paper, we proposed the design of frequency regulation market. Then we evaluated the economic value of EVs for ancillary services, and examine the potential of diffusion.

目次

概要

1. 提案の目的と背景	1
2. 周波数調整市場の提案	2
2.1 提案市場の概要	2
2.2 起動停止計画	2
2.3 火力機の出力状態と LFC 調整コスト	3
2.4 LFC 調整力の入札	3
2.5 周波数調整市場における価格	4
3. EV ポテンシャルの普及評価	6
3.1 消費者選好モデルの作成	6
3.2 普及ポテンシャルの評価	6
4. 政策立案のための提言	7
参考文献	7

1. 提案の目的と背景

本稿では、発送電分離、電力小売自由化が実施された後の日本を想定した、負荷周波数制御 (Load Frequency Control, LFC) 調整力を調達する周波数調整市場の提案を行う。また、需要家側資源として電気自動車 (EV) を活用し、周波数調整市場に参加した時の収益性を評価し、アンシラリーサービス料金によって、販売のシェアがどのように変化するか、定量的な評価を行う。

提案の背景としては、第五次電気事業制度改革により大きな変換点を迎える、我が国の電気事業において、送配電会社が LFC 調整力を十分に確保するための、新たな制度設計が求められることにある。電力会社の発電部門と送配電部門の法的分離が行われると、発電設備を保有しない送配電会社は、相対契約等の手段を通じて、アンシラリーサービスを外部から調達しなければならない。新電力 (特定規模電気事業者 (Power Producer and Supplier, PPS)) の参入や、再生可能エネルギーの導入が進む今日においては、調整力を市場調達することが有効と考えられる。また、運輸部門の CO₂ 排出を目指して、世界各国で EV の高い普及目標が掲げられているが、高い初期費用の参入障壁を理由に、普及が十分には進んでいない状況である。V2G (Vehicle to Grid) の機能を有する EV を購入して、周波数調整市場に参加した際に、系統への貢献の対価として得られる収益が、EV の普及を拡大させる効果について注目する。

2. 周波数調整市場の提案

2.1 提案市場の概要

発電事業者が提案市場へ参加する際に、発電機から LFC 調整力を提供する大まかな流れを説明する。初めに、各発電事業者は、対象日の前日段階に、翌日の需要予測や再エネの出力予測に基づき、30 分単位の発電機起動停止計画を作成する。次に、起動停止計画で決まった火力機の出力状態に基づき、個々の発電機が LFC 調整を行う為に要する追加コストを算出する。送配電会社はオファー価格の安いものから順に約定を行い、調整力が必要容量に達するまで調達を行う。以上の流れに沿って、取引および入札を行うものとする。

2.2 起動停止計画

シミュレーション対象として、東北電力管内を想定したモデルシステムを用いる。負荷変動は、東北電力が提供する 1 年間の実績値データを使用している。電源構成は表 1 に示す通りになっており、火力発電機については定格出力等の諸元が、各発電機に対して個別に把握できるようになっている^[1]。

表 1 モデルシステムの電源構成

	Rated Capacity [MW]
Nuclear Power	1,925
Hydroelectric Power	1,978
Thermal Power	12,433
Coal	3,200
LNG	2,489
GTCC *	4,861
Oil	1,883

* GTCC, ガスタービンコンバインドサイクル。

再生可能エネルギー電源は表 2 に示すように、Case.1 として 2015 年 10 月時点での系統連系済み設備容量を、Case.2 として東北電力による接続可能量算定値を設定し、これら 2 通りについて検討を行った^[2]。

表 2 再生可能エネルギー電源の設備容量

	Wind [MW]	PV [MW]
Case.1	660	2,090
Case.2	2,510	5,050

起動停止計画は、優先順位法と動的計画法を統合した手法により作成している。まず、定格出力時の発電単価が安い順に発電機を起動し、必要発電量、運転予備力を満たす最低起動台数を決定する。次に、最低起動台数以上の何台の発電機を起動させるかの候補から、時間遷移に伴って起動費および燃料費を考慮し、発電コストが最小となるルートを決める。この過程を繰り返すことで、各時間断面における起動台数が一意に求まる。出力配分の決定は、総燃料コストを目的関数、需給バランス制約および出力上下制限制約を制約条件とする二次計画法により求めている。

2.3 火力機出力状態と LFC 調整コスト

起動停止で決まった火力機の出力状態の分類について図 1 を基に述べる。本稿では、火力機の LFC 調整幅を定格容量の 5% と設定した。5% の出力変動幅を持たせるには火力機の負荷率を 95% 以下にしなければならない。この定格 95% を LFC 上限と呼ぶ。また、火力機を LFC 制御に用いるためには、ある一定以上の負荷率でなければ制御を行えないという下限値が各火力機ごとに固有に決まっており、この値を LFC 下限と呼ぶ。これら LFC 上限と LFC 下限に挟まれた範囲を LFC 帯と言い、LFC 制御をする際には、負荷率をこの領域に収めなければならない。LFC 上限と定格運転（最高出力）の間の領域を最高負荷帯、LFC 下限と最低出力の間の領域を、最低負荷帯と呼んでいる。

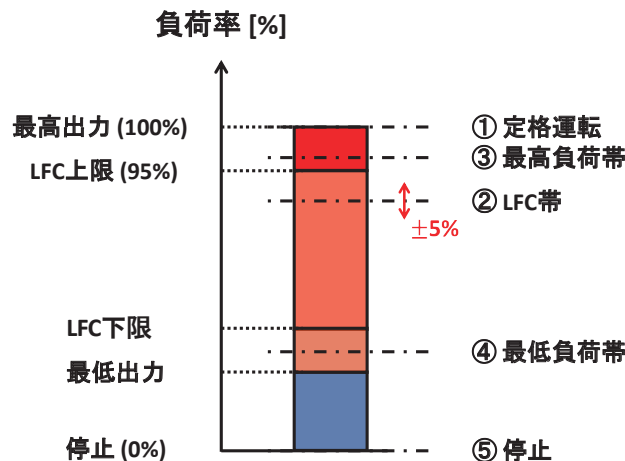


図 1 火力発電機の出力状態

各発電機の状態から LFC 制御を行う際に生じる追加コストから、LFC 調整コストを算定する手法を説明する。火力機が定格状態、または最高負荷帯の状態にある時、LFC 制御を行うには、LFC 上限まで出力を抑制しなければならない。この時、出力を下げたことにより、元の負荷率における燃料費と LFC 上限における燃料費の差が、燃料費の減額として計算できる。これと同時に、出力を下げたことによって発電量が減少しており、発電量減分に相当する電力を売電する機会を逸したと考えることができる。すなわち、定格容量の 5% の LFC 調整力を提供するために、これらの燃料費用と機会費用の収支が伴ったと考えることができ、単位容量当たりの LFC 調整コストを定義することができる。

次に、火力機の出力が LFC 帯にある時は、LFC 制御を行うために負荷率を変化させる必要はないため、LFC 調整コストは 0 となる。さらに、最低負荷帯にある時、LFC 下限まで出力を追加しなければならない。既述のように燃料費用と機会費用から LFC 調整コストを計算できる。

EV の LFC 調整コストに関しては、双方向充電が可能な充電器とパワーコンディショナー (Power Conditioning System, PCS) を考慮した設備費用が 45 万円、割引率を 5%、稼働率を 81.5% とし、2.72[JPY/kW・h] と計算した。

2.4 LFC 調整力の入札

算定した LFC 調整コストに基づき、調整力の入札を行う流れについて説明する。市場参加する各資源を、LFC 調整コストが安いものから順に積み上げ、累積量が必要 LFC 容量に達するまで入札を行う。必要 LFC 容量の決定は、時刻 t における総需要の 2%、太陽光出力の 5% と、風力定格容量の 3% を合計したものと設定した。積み上げた供給曲線と必要 LFC 容量の交点によって、時刻 t における周波数調整市場価格が決定される。

2.5 周波数調整市場における価格

図 2、図 3 は、Case.1、Case.2 の一日 24 時間の周波数調整市場価格の変化を、季節毎、平日・休日別に各時間断面で平均したものを表す。Case.2 において再生可能エネルギー導入量が増加すると、必要 LFC 容量が増し、それによって市場価格が増加する傾向がグラフの比較から見て取れる。ただし、ピーク需要が低い季節に太陽光の出力が増加すると、需給運用において火力発電機が担う発電量が減少し、予備力を確保するために部分負荷運転の台数が増え、市場価格が下がるという結果も見られる。

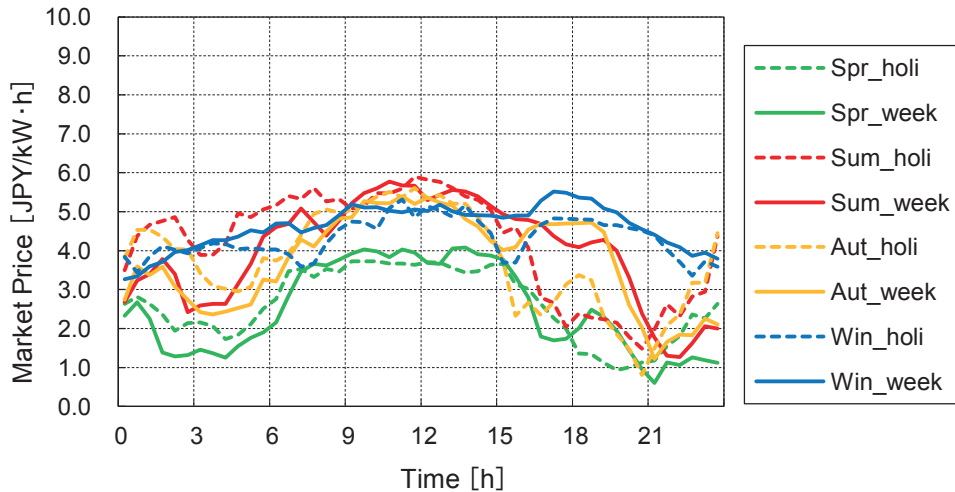


図 2 Case.1 の周波数調整市場価格
(再生可能エネルギー電源は、2015 年 10 月時点での系統連系済み設備容量)

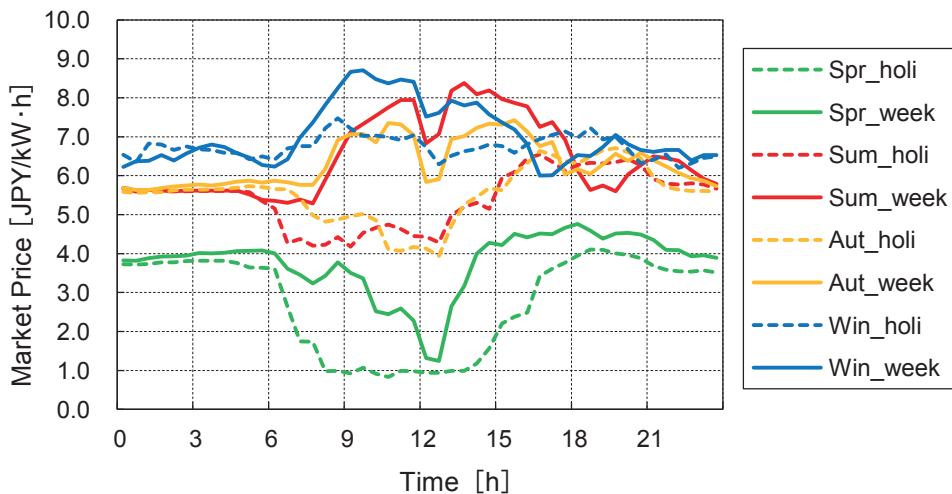


図 3 Case.2 の周波数調整市場価格
(再生可能エネルギー電源は、東北電力による接続可能量算定値)

図 4 の縦軸は、1 年間での EV1 台あたり獲得金額を表しており、EV の市場参加台数や再生可能エネルギー導入のケースによって、5 万～13 万円の報酬が得られる結果となっている。EV の市場参加台数が増えると、LFC 調整コストが高い火力機が追い出され、市場価格が下がり、獲得報酬も下がる結果となっている。Case.2 で再生可能エネルギーの導入量が増した場合、年間での総収益は Case.1 より増加している。

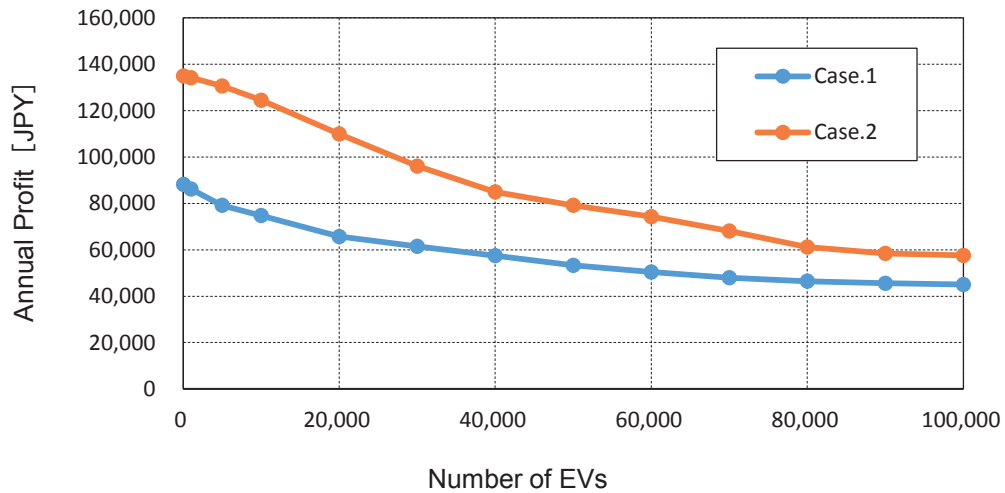


図 4 EV の市場参加台数の影響

3. EV ポテンシャルの普及評価

3.1 消費者選好モデルの作成

普及ポテンシャルの評価の流れとしては、初めに自動車販売の実績データベースを基に、実績の消費者選択を再現した車種選好モデルを作成する。ここでは、自動車の選択のような質的データを分析する際に有効な、ロジットモデルと呼ばれる手法を用いる^[3]。ロジットモデルはマーケット分析等において頻繁に使われる手法である。自動車の選択を行う際、消費者は本体価格やデザイン、大きさ等といった様々な要因から影響を受け、選択肢の決定を行う。この時、消費者が消費する財から受ける満足の度合いを数量的に表現したものを、効用と呼ぶ。ロジットモデルでは、消費者は、この効用が最大となる商品の選択を行うものとする。本稿では、市場から獲得する収益の影響を評価するため、これら費用に関する影響度を分析する。効用を定量的に表す効用関数は確定項と確率項の和で表され、確定項はイニシャルコストとランニングコストから構成されている。

イニシャルコストおよびランニングコストには、車両本体価格や各種税金、燃料費等が反映されており、まず実績データから説明変数の係数を決定した後に、ランニングコストに市場による報酬を加味させる。作成したデータベースは、2014 年販売実績データを基に作成しており、型式ごとに、販売台数と各諸元が分かるようになっている。

本稿では、階層型のネステッドロジットモデルを採用しており、消費者の選択は、まず、ガソリン車および在来型ディーゼル車、ハイブリッド車、輸入車、次世代自動車に分類された 4 グループの中からグループ選択を行い、その後に型式選択を行うものと仮定している。尤度関数を最大化するパラメータを決定することで、消費者選択を再現した選好モデルを作成できる。

3.2 普及ポテンシャルの評価

図 5 は周波数調整市場からの年間報酬に対する、EV およびプラグインハイブリッドカー（Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV）の選択率の変化を示す。報酬が増加するに伴って選択率は上昇しており、市場報酬を評価した際の、5 万～13 万円の範囲では、選択率が約 4～14% となることが分かった。

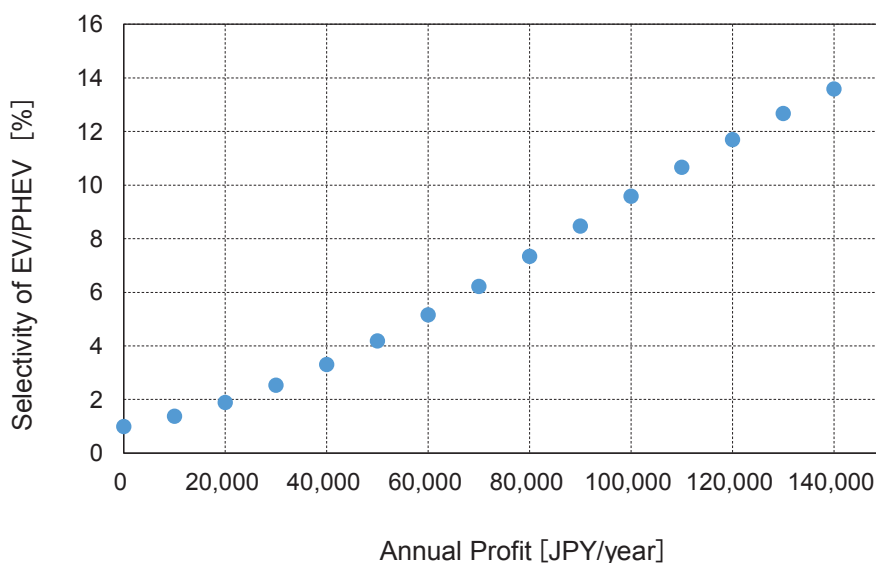


図 5 市場報酬による選択率の変化

4. 政策立案のための提言

今後、我が国の CO₂ 削減目標の達成のために、電源構成に占める再生可能エネルギー電源の割合が増加することは確実である。一方、太陽光発電や風力発電は、急峻な出力変動を起こすため、大量導入時における系統安定性が不安視されている。特に、再生可能エネルギー電源が電源構成を占める割合が増加することで、従来の LFC（負荷周波数制御）の中心を担ってきた火力や可変速揚水発電の比率が減少し、周波数調整力が不足する事態が懸念される。こうした背景から、自由化後の送配電会社が周波数調整力を確保するための新たな制度設計が必要である。これには、蓄電池や電気自動車など需要側に存在する資源を系統に接続し、周波数制御に利用することが有力であるが、そのためには周波数調整市場を設計し、早急に開設しなければならない。

電力自由化が先行している欧米諸国を見ると、例えば米国の PJM¹⁾ におけるアンシラリーサービス取引の一環として、すでに周波数調整市場ができており、蓄電池や電気自動車が周波数制御に参画し、当該地域の電力系統の安定化に貢献している。一方、これらの需要側資源は、周波数調整市場への参画により、本提案書で述べたようなキャッシュフローを獲得することができる。このことは、これらの技術の更なる普及を促進し、経済の活性化、再生可能エネルギーの普及促進、CO₂ の削減につながるであろう。

したがって、我が国のエネルギー政策の一環として、周波数調整市場の早急な設計と開設が望まれるところであり、本提案書がその一助となることを願ってやまない。

参考文献

- [1] 「電気事業連合会統計委員会 平成 27 年度版 電気事業便覧」、2015 年、一般財団法人 日本電気協会。
- [2] 「風力、太陽光の 2015 年度算定値等の考え方および算出結果について」、http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/keitou_wg/pdf/007_04_00.pdf、2015 年 11 月 10 日、経済産業省、2015 年 12 月 15 日アクセス。
- [3] 「消費者選好の経年変化の分析による低燃費車普及インセンティブの効果に関する研究」、2013 年 3 月、西崎陸、東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文。

¹⁾ PJM, Pennsylvania-New Jersey-Maryland の略。米国 13 州とワシントン DC 地域の電力システムを管轄しながら、卸電力市場も運営する独立系統運用機関（Independent System Operator, ISO）。送電線の所有権は電力会社が保持し、運用・管理は独立機関が行う。

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

既存電源および電気自動車の活用を考慮した
周波数調整市場の設計とその経済性評価

平成 28 年 3 月

**Design and Evaluation of Frequency Regulation Market
Using Conventional Power Plants and Electric Vehicles**
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,
2016.3

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 山本 有途 (Yuto YAMAMOTO)
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/>

© 2016 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。
