

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

電気自動車を活用した負荷周波数制御の 通信遅延補償のための制御方式の提案

令和 3 年 7 月

Proposal of Control Method for Compensating Communication Delay
in Load Frequency Control Using Electric Vehicles

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-FY2020-PP-14

概要

再生可能電源の出力は気象条件によって変動するため、系統への大量連系により系統電力における周波数の安定性に深刻な懸念が生じている。電気自動車（以下、EV と記述する）は、その蓄電池の応答性の速さから、周波数制御、とりわけ負荷周波数制御（以下、LFC と記述する）の領域において有力な解決策の一つと考えられている。しかしながら、LFC 調整市場に参加する EV アグリゲータ（以下、EVA と記述する）は、公共の通信インフラ利用に起因する通信遅延の影響を受ける恐れがある。本提案書では、EV の負荷調整力の向上を目的として、EVA が通信遅延を補償するための方策の設計を行う。具体的には、定周波数制御（FFC）方式が適用されている電力系統において、過去のデータ履歴から、系統における LFC 制御指令と周波数偏差の関係を推計した上で、リアルタイムの周波数偏差を用いて EV を直接制御する制御方式を提案する。本方式は低コストで実現可能であり、また、本方式によって EVA の周波数制御市場における競争力を高めることが期待できる。本方式における性能の向上余地については Simulink の AGC30 モデルの動的シミュレーションを用いて検討し、パフォーマンススコアに基づいて評価を行った。シミュレーションによると、提案の制御方式を導入することで EVA のパフォーマンススコアは有意に向上し、同時に周波数変動をも低減できることが明らかとなった。本分析の結果より、EVA による負荷周波数制御は有望であり、日本において周波数調整市場が開設される 2024 年以降に採用される可能性があることが示唆された。

なお、本提案書は、著者らの英文論文 [1] の内容を元にして、低炭素社会の実現につながる政策への含意、さらには政策提案につなげたものである。

Summary

Due to the output fluctuation of renewable power sources depending on climate situation, serious concerns are arising on frequency stability accompanied by large integration of renewable energy sources. The utilization of electric vehicles (EVs) is considered to be one of promising solutions in frequency regulation especially in load frequency control (LFC) domain because of the fast-response characteristics of the EV batteries. However, the EV aggregators (EVA) participating in LFC regulation market may suffer from communication delays caused by the open communication infrastructure. In this document, a control method is proposed to compensate the communication delays for EVAs in order to improve the performance of frequency regulation of EVs.

We proposed the novel method estimating the relationships between the LFC control signal and the frequency deviation in the system from historical data. Then the system was assumed to control the EVs directly through the real-time frequency deviation in power systems which apply Flat Frequency Control (FFC). Since the implementation cost is small, EVAs are expected to be more competitive in the frequency regulation market. The performance improvement is verified by dynamic simulation on AGC30 model in Simulink and evaluated based on performance scores. The performance scores of EVA increased significantly in the simulation, and the system frequency fluctuation was concluded to be reduced by applying the proposed control method. The investigated results implied that the proposed method for the load frequency control by EVAs is promising to be adopted after 2024, when the frequency regulation market will be opened in Japan.

Taking the contents of the paper [1] into consideration, the author derived the implications in this document for policies that lead to the realization of a low-carbon society, as well as policy proposals.

目次

概要

1. はじめに	1
2. EVA による負荷周波数制御システムのシミュレーションモデル	3
2.1 電力系統モデル	3
2.2 負荷周波数制御のモデル開発	4
2.3 電気自動車アグリゲータ（EVA）のモデル開発	6
3. 電気自動車アグリゲータ（EVA）による負荷周波数制御方式の設計	7
3.1 周波数制御システムの基本アルゴリズム	7
3.2 提案方式による周波数制御の構造	9
4. 提案制御方式によるシミュレーション結果	11
5. 結論	17
5.1 本提案書の結論	17
5.2 政策立案のための提案	17
参考文献	19

1. はじめに

近年、電気自動車（EV）の普及が進んだことにより、特に気象条件によって出力が変動する性質を有する再生可能電源が大量に接続された電力系統において、EVが電力系統の安定性の改善に貢献できる可能性が出てきた。EVの活用については様々な議論があるが、EVのバッテリーを用いた周波数調整は、その応答性の速さから最も有力な選択肢の一つとみなされている。EVの速い応答性を遺憾なく発揮できるのは、いわゆるガバナフリー制御 [2] および負荷周波数制御（LFC） [3, 4] の領域である。双方について、多くの研究がなされてきた。

しかし、ガバナフリー制御における需要家サイドからの調整については市場原理が働きにくい。ため、PJM、CAISO、MISOといった諸外国の系統運用者は、需要家サイドの調整力がLFCの領域に参加することを前提にアンシラリーサービス市場を展開している。さらに、米国連邦エネルギー規制委員会は、2011年に公表した第775指令において [5]、「マイレージ」の概念を導入することで市場を修正し、またEVのような応答性の速いリソースの市場参加を促した。これらの状況を踏まえ、本提案書では対象とする市場をLFCに絞って検討を行うこととした。

EV単体の出力レベルは、3 kW～6 kW程度と小さい。周波数調整市場は通常、需要家のリソースの参加にあたっては出力レベルの下限を設けている（PJMにおいては0.1 MWが最低調整容量 [6]）ため、EVが調整市場に参加するためには、集合体として参加する必要がある [7]。一方、日本においても、現在、負荷周波数制御を含む調整力を取引する需給調整市場に関する審議が行われている最中である。表1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 [8]。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て調整力が定義されている。例えば、上述したLFCは表1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（Economic Load Dispatch Controlを意味し、LFCに対してEDCあるいはELDとよばれることもある）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。なお、現在の需給調整市場における制度設計案としては、LFC（二次調整力①）市場の入札に参加するには、表1にあるように最低5 MWを集める必要があり、上述した米国PJMの0.1 MWよりもはるかに厳しい制限となっている。この点については、今後のOCCTOにおける審議状況を注視していく必要がある。

いずれにしても、EVを集合体として扱うことにより提供できる調整力の不確実性を下げ [9]、EVAが電力系統と個々のEVオーナー双方に物理的・経済的メリットをもたらす仲介を行える可能性がでてくる [10]。

LFCでは、周波数制御のための技術は当該地域の系統運用者の中央給電指令所より出される制御指令に応動することとなるため、情報通信技術が重要な役割を果たす。通常、指令は公共の通信線を通じて中央給電指令所からEVAに送られ [11]、EVAが受け取ったLFC指令を個々のEVに送ることになる。個々のEVへの通信手段としては、電力線通信（PLC）、固定ブロードバンド回線、携帯電話網、Wi-Fiなど、導入コストが低い手段が優先的に選ばれることとなろう [12]。

どちらのデータ伝達過程においても遅延は起こり得るが、特に後者においては深刻な遅延が起こり得る。先行研究におけるハードウェアインザループ（HIL）シミュレーションでも、LFC指令の遅延により問題が生じることが指摘されている。文献 [13, 14] では、系統の周波数偏差の二乗平均値をHIL実験と、non-hardwareシミュレーションの二通りの方法で計算している。どちらの方法でも、系統の周波数偏差はEV無しケースと比べて大幅に低減したが、HIL実験の場合はシミュレーションの場合と比べ、わずかながら劣った結果となった。これは、HIL実験においては、指令がイーサネットケーブル経由でEVに送られる際にLFC指令が0.8秒遅延したことに起因

表1 需給調整市場における各調整力の概要と必要条件 [8]

	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費)	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国で検討中のため、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有り (データの取得方法、提供方法等については今後検討)。

※3 沖縄エリア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。

する。

一方で、他の研究において、EV がガバナフリー制御において、需要端で測定された周波数偏差によって直接制御されたケースでは、HIL 実験と non-hardware シミュレーションの間にほぼ差異は生じなかった。こういったケースでは、制御指令の伝達遅延は生じないからである。

EV を需要端で計測された系統周波数によって直接制御する方式には (遅延がないという) メリットはあるが、ガバナフリー制御ではアンシラリーサービス市場における価格が低くなりがちである。その一方で、負荷周波数制御であれば、アンシラリーサービス市場における価格がガバナフリー制御よりも高くなることが期待されるものの、EVA が系統運用者の LFC 指令にできる限り遅延なく追従する必要がある。周波数制御技術が、LFC 指令にどの程度迅速に追従できるかにより、市場参加者が受け取ることができる報酬や、市場における競争力が決まってくるためである。PJM では、市場に参加している制御技術ごとに、過去の実績に応じたパフォーマンススコア [15] が評価されている。他の系統運用者も同様の方式を採用している。この他にも、文献 [16] では EVA が遅延問題改善に対する動機付けを与えるために、新たなマイレージ報酬制度が紹介されている。

本提案書では、LFC 制御市場に参加しようとする EVA のための新たな制御法を提案する。提案制御方式は、LFC 指令の伝達遅延を補償することで、EVA の調整出力が LFC 指令に迅速に追従することを可能とし、もって周波数調整市場における高いパフォーマンススコアの獲得を目的とする。提案書構成としては、まず第2章にてシステムのシミュレーションモデルを紹介し、第3章で提案する制御方式の議論を行う。第4章ではシミュレーション結果と分析を示す。最終章では結論と、政策提案の概要を示すこととする。

2. EVA による負荷周波数制御システムのシミュレーションモデル

本提案書では、文献[17]で発表された AGC30 モデルに基づくシミュレーションモデルを用いた。本モデルはわが国の負荷配分および系統周波数分析の学術分野では広く受け入れられている。正確には、本検討における EVA には文献[17]の第2ケースの状況、つまりシステム負荷は比較的軽微で、かつ、太陽光発電や風力発電といった再生可能電源は系統に接続されているという設定を適用することとする。シミュレーションの時間刻みは 0.1 秒とした。遅延については本章にて議論する。

2.1 電力系統モデル

本提案書では、図1のとおり、2エリアを連結した系統モデルを検討した。A エリアを本シミュレーションにおけるメインターゲットとし、B エリアは単純化したモデルで代替した。本シミュレーション中 A エリアでは7か所の石油火力発電所、4か所の石炭火力発電所、7か所の LNG 火力発電所と 10 か所のガスタービンコンバインドサイクル発電所（GTCC）、3か所の水力発電所、計 31 か所の発電所についての詳細なモデルが含まれる。再生可能電源と原子力発電を含むベース電源は時系列データとして与えることとする。

系統の基本的な各種定数を表2に示す。

表2 系統の各種定数

公称周波数	50[Hz]
火力発電 定格容量	12600[MW]
水力発電 定格容量	900[MW]
ベースロード電源 定格容量	7915[MW]
A エリアのピーク時における需要	10665[MW]
B エリアのピーク時における需要	10642[MW]
太陽光発電 ピーク時出力	1513[MW]
風力発電 ピーク時出力	77[MW]
A エリアの LFC 容量	±2%
B エリアの LFC 容量	±2%
A エリアの GF 容量	±3%
B エリアの GF 容量	±3%
公称連系線潮流バイアス	0[MW]

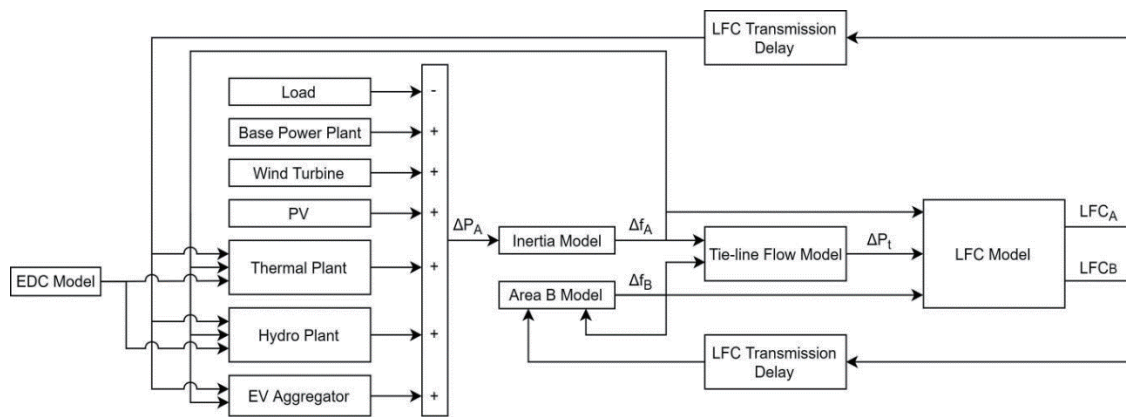


図1 系統モデルダイアグラム

2.2 負荷周波数制御のモデル開発

電力系統において、LFC 指令は、エリア内の発電所からの出力を補正するために系統運用者によって計算される制御指令である。LFC は自動発電制御（AGC）、または、二次周波数制御とも呼ばれる。一般的に、LFC 指令は定周波数制御（FFC）方式または周波数偏倚連系線電力制御（TBC）方式のいずれかで計算される [18]。FFC 方式の目的は、リアルタイムの周波数偏差に基づき、系統全体の周波数を公称値に戻すことである。この方式は通常、単独系統、あるいは連結系統の場合はメインの系統において採用される。これに対し、TBC 方式では当該エリアにおける負荷変動に基づいて出力調整を行う。当該エリア内での負荷変動をリアルタイムで把握するのは困難なため、系統の周波数偏差およびエリア間の連系線潮流バイアスを用いてこれを算出する。TBC 方式のもう一つの目的は、連系線潮流バイアスを管理することである。

図2、図3に、FFC・TBC 各方式における LFC モデルのブロック図を、表3にここで用いた諸定数を示す。FFC 方式では、地域要求量（Area Requirement; これ以降では AR とする）は系統全体の周波数偏差とリアルタイムの容量の積として算出される。LFC は数秒～20 分程度の変動のみを対象としており、高周波成分を取り除くためにローパスフィルタが適用されている。これに加え、微小な入力信号が出力に影響を及ぼし、同期機のハンチングやシステムの不安定化を引き起こすことを避けるために不感帯が設定されている。

PI 制御の設計は本提案書の主眼ではない。そこで、AR が既に出力の必要な変化を代表しているとみなし、比例ゲインは1、積分ゲインはオーバーシュートを避けるために単純に0.003 とおくこととした。LFC においてより現実的な動態を得るために、PI 制御においては、一地域の系統容量の約±2%にあたる±200 MW を上下限とするアンチwindアップ方式が採用されている。TBC 方式における LFC 構成は、AR の計算に連系線潮流バイアスが含まれる点を除いては、FFC 方式のものとほぼ同じである。AR は連系線潮流バイアスに、系統周波数偏差とエリアのシステム容量の積を加えたものに等しい。エリアの連系線潮流バイアスは正の値を取ると考えられる。

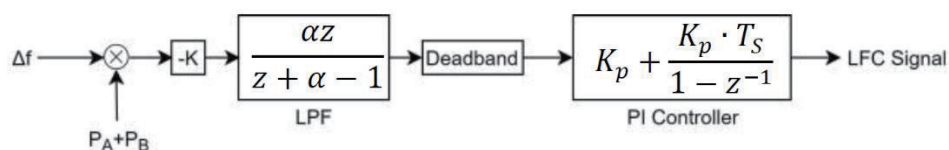


図2 FFC 方式の場合の LFC モデル

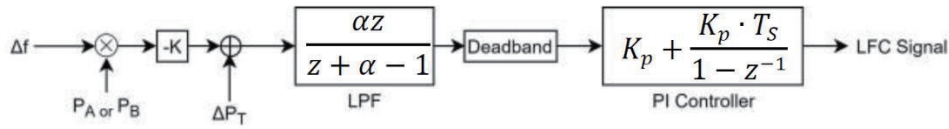


図3 TBC方式の場合のLFCモデル

表3 LFCにおける諸定数

パラメータ	記号	値
系統周波数偏差	Δf	- [Hz]
連系線潮流バイアス	ΔP_T	- [MW]
系統定数	K	10%
系統容量	P_A, P_B	- [MW]
ローパスフィルタ係数	α	0.3
不感帯幅		± 10 [MW]
比例ゲイン	K_p	1
積分ゲイン	K_I	0.003
LFC サンプル時間	T_s	5 [s]
ハイパスフィルタ係数	a, b	0.905, 0.952

計算された LFC 指令は各周波数制御技術に送られる。A エリアにおいては、EVA に送られた指令は、EV 用蓄電池の応答性の速さを遺憾なく発揮するためにハイパスフィルタで抽出される。残りの LFC 指令は応動速度に従って通常通り各々の LFC 発電所に配分される。LFC 指令発信のブロック図を図 4 に示す。傾斜率は式 (1) にて計算される。

$$P_i = \frac{Ramp_i}{\sum Ramp_i} \quad (1)$$

B エリアのモデルは単純化しているため、火力発電は足し上げて一つのモデルとして扱い、個々の発電所からの LFC 指令への影響は考慮しないこととした。

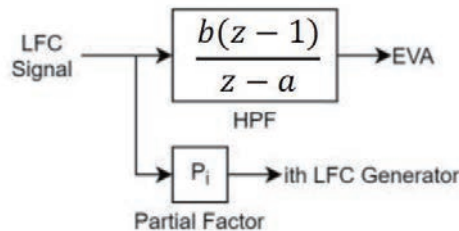


図4 LFC 指令の配分

2.3 電気自動車アグリゲータ（EVA）のモデル開発

EV 単体の充放電の動態は蓄電池システムのものと同等とみなすことができる。EV は、元々供給サイドの制御装置ではなく需要家サイドの設備であるため、LFC 調整技術としての調整力提供の不確実性や EV の所有者の利便性を考慮する必要がある。このことを踏まえ、LFC 制御にあたっては、電源プラグに繋がれ、かつ EV の充電状態（SOC）が 70%～95%の間にある EV のみを利用できることとした。これにより、EV の所有者が EV を使いたい時にいつでも SOC は 70%以上で、短距離の移動に差し支えることはないという状態を維持することができる。

本提案書では、文献 [19] において開発された制御戦略を採用した。EVA は制御下にある EV の SOC に応じて LFC 指令を送る。EV の SOC が下がると、当該 EV にはより多くの LFC 充電指令が送られるようになる。EV の充電状態が高い場合には、LFC 放電指令が送られる。この戦略を採用することで、各 EV の充電状態は平均レベルに近づいていくこととなる。また、EV の集合体の動態は制御可能な EV の容量の合計と同等の単一の大きな蓄電池がある場合に近づいていく。

EV 制御における遅延には、処理遅延とネットワーク遅延の二通りがある。処理遅延がデータベース読み書き時のサーバ、またはルータにおける遅延により生じるのに対し、ネットワーク遅延はネットワークでのデータ転送時に発生する [20]。これら二種の遅延の合計が、通信遅延の総計である。無線マルチホップ通信において、ネットワーク遅延時間はホップ数に比例するとされている。EVA は中央給電指令所からの指令を受信して各々の EV に発信しなければならないため、EVA のサーバにおいては、より長時間の処理遅延が起こりがちである。

さらに、EVA 配下にある EV は処理遅延により深刻な影響を受ける可能性がある。本提案書の EVA モデルに用いられる集約 EV モデルを図 5 に示す。日中の制御可能 EV 数には文献 [21] の分析を用いた。EVA 内に蓄積されている電気エネルギーは、その初期値と制御可能（SOC が 70%以上）な EV 数、プラグにつながれていない EV 数で決まる。このシミュレーションでは EV 数は大きく変動しないため、蓄積エネルギーの算出にあたってはその初期値のみが考慮されている。全ての EV の遅延時間は同じとみなし、分析を単純化するために集約モデルとして扱っている。また、EVA が対象とするすべての EV は、同じ充電インバータと蓄電池を搭載しているものとしている。 C_{kw} 、 C_{kwh} はそれぞれ、制御可能な EV 全体の充電インバータと蓄電池の容量の合計である。いずれも、EV 単体の容量と制御可能な EV 数の積で計算される。 T_e は EV 用蓄電池固有の充放電時の遅延時間を示す定数である。表 4 に EVA モデルの諸定数を示す。

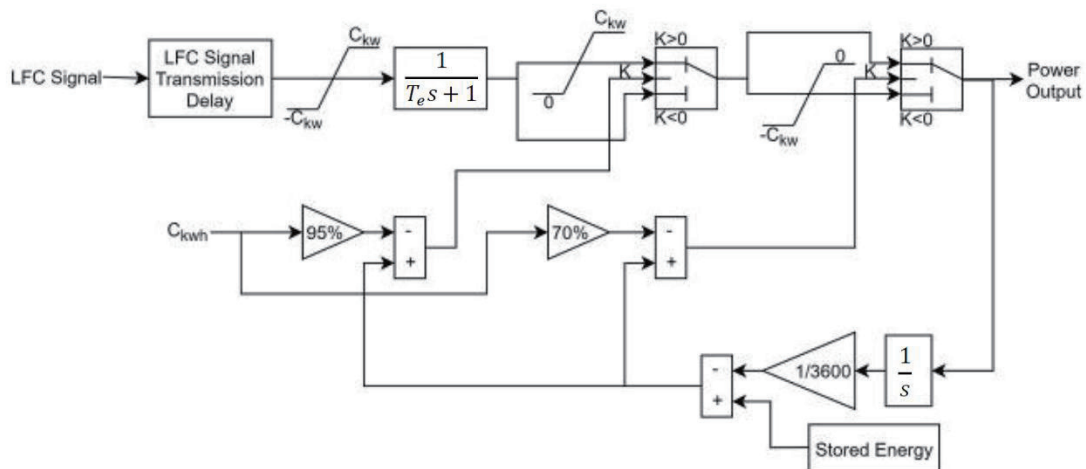


図 5 EVA モデル

表4 EVAモデルの諸定数

諸定数	値
制御可能なEV数平均	23,000
単一のEVインバータ容量	3[kW]
単一のEV蓄電池容量	21.3[kWh]
EVAの総SOC 初期値	85%
EV蓄電池 時定数	1[s]

3. 電気自動車アグリゲータ（EVA）による負荷周波数制御方式の設計

データ転送遅延の補償についての検討には、通常スミス予測器が用いられる [22]。しかし、スミス予測器は主に制御ループ内の純粋な遅延からくる不安定化の問題を解決するためのものであり、今回の EVA の検討にはそぐわないと考える。EVA の容量は系統全体の容量と比較すると非常に小さく、伝達遅延がシステム全体を不安定化するとは考えにくいためである。

EVA の通信遅延を考慮したロバスト制御のスキームについてもいくつか提案されている [23]。LFC 指令の伝達遅延は、従来型の電力系統制御においても生じており、研究もなされてきた [24, 25]。しかし、これらの制御設計の主たる目的は遅延発生下での系統全体の安定性と堅牢性を向上することにあった。これら制御スキームは、系統の中央給電指令所のためのものである。さらに、これらロバスト制御の設計と計算のためには系統の状態空間モデルが必要となるが、現実的にはこれらを手するの難しい。

先に述べたように、市場原理のもとでは EVA は遅延の問題を自力で改善・解決することが望ましい。したがって、本問題は系統運用者ではなく EVA に帰するのが適切と考える。EVA にとって、遅延を補償する主たる目的は、EVA の出力が受信した LFC 指令に素早く追従する能力を向上することで、LFC 調整市場におけるさらなる優位性を獲得する点にある。データ転送における純粋な時間遅延は、LFC 指令と EVA の出力の差を生み、EVA の市場におけるパフォーマンス評価を引き下げる点となる。

本提案書では上述の問題に対する適用可能な制御法を示す。ここで提案する制御方式は非常にシンプルで、各 EV の充放電制御システムに搭載することも可能であると考えられる。提案制御方式は、受信した LFC 指令の履歴データおよび周波数偏差の履歴データに基づいてパラメータを調整し、系統から計測されるリアルタイムの周波数偏差に基づいて EV の周波数を制御するものである。提案制御方式においては、EVA に対する制御指令は、リアルタイムの周波数偏差データに基づいて予測し、再構築する。この指令は、系統運用者により遅延なく計算されるオリジナルの LFC 指令に近いものとなるはずである。

3.1 周波数制御システムの基本アルゴリズム

文献 [13, 14] の HIL 実験により、系統の周波数偏差から直接制御された EV の方が遅延の問題の影響を受けにくいことが既に示されている。FFC 方式の系統では、LFC 指令は電流の周波数偏差と系統容量のみから計算される。現実には系統運用者はより複雑な制御ロジックを用いている可能性があるが、その動態は、図 2 に示すように PI 制御を用いた線形システムでモデル化することができると考えられる。系統容量である P_A および P_B は、比較的短期間の範囲内では小幅にしか変動しないため、定ゲインに近似できる。したがって、FFC 方式で運用されているエリアにおいては、出力と LFC 指令が履歴データから推計することができれば、EVA は系統の周波数に基づいて EV の出力を LFC 指令に密に追従できるよう制御することが可能である。

LFC 指令を推計するための制御ブロックを図 6 に示す。受信する LFC 指令の遅延時間を T_d とおく。需要端で測定する周波数偏差は当然のことながら遅延しない。また、系統周波数は、遅延した LFC 指令を受信したのと同じのサンプリング時間 (T_s) において計測する。まず、同一の時間フレーム内における関係性を調べるために、測定系統周波数において発生する Manual 遅延を T_d' とおく。LFC 指令のサンプリング時間 T_s では、この結果、式 (2) を満たす範囲において二つの指令は同一の時間フレームであるとみなすことができる。

$$|T_d - T_d'| \leq T_s \quad (2)$$

現実の電力系統において、LFC の制御パラメータは時間軸に沿って変化するが、通常は短時間の間に大きく変化することはない。したがって、数分といった比較的短時間を扱う場合、LFC は線形時不変システム (LTI) とみなすことができる。FFC 方式では、図 2 で示されるように、周波数偏差 Δf が入力信号、LFC 指令が出力信号となる。この仮定のもとでは、入力信号と出力信号の関係は、式 (3) のとおり離散時間領域における Z 伝達関数の形で表せる。Z 伝達関数は、離散時間信号の複素周波数領域表現であり、周波数領域のラプラス変換関数の離散時間式とみなすことができる。より高次の Z 伝達関数を用いることでより複雑かつ詳細な系統の動態を代表することができるが、動的解析の実施はより困難となってくる。そこで本提案書では、LFC の動態を十分に再現でき、かつ動的解析における計算の負荷が比較的小さいという理由で、2 次の伝達関数 $E(z)$ を用いた。

$$E(z) = \frac{LFC(z)}{\Delta f(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3)$$

このデジタル制御系において、 z^{-1} を乗じることが指令に 1 ステップ分の遅延を適用することにあたる。

式 (3) は式 (4) と書き換えることができる。 $[k]$ は指令の k 番目のサンプルを表す。十分なデータサンプルが記録されている場合、 $E(z)$ の係数は式 (4) を最小二乗法で解くことによって計算できる。

$$\Delta f[k]b_0 + \Delta f[k-1]b_1 + \Delta f[k-2]b_2 = LFC[k] + LFC[k-1]a_1 + LFC[k-2]a_2 \quad (4)$$

推定 LFC 指令はコントローラに $E(z)$ 、制御入力にリアルタイムの周波数偏差を代入することで導くことができる。推定 LFC 指令は、遅延のない元の LFC 指令に近いものとなるはずである。

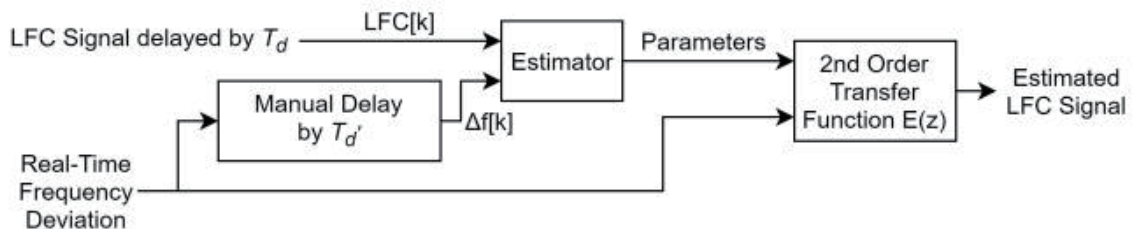


図 6 提案方式による周波数制御ブロック

TBC 方式では、LFC 指令を算出するためには Δf および ΔP_T 、2 種の入力が必要である。しかし、EVA が ΔP_T についての情報を得るのは困難であるため、当該手法は実行可能とはいえない。したがって、EVA が本推計アルゴリズムを有効に活用できるのは、FFC 方式で運用されているエリアのみとなる。

3.2 提案方式による周波数制御の構造

式 (4) において未知の変数は 5 つしかないため、12 サンプルを含む 1 分データがあれば推計には十分である。3.1 節にて述べたとおり、LFC モデルは線形システムとみなすことができるが、長期的にみても時間に依存しないとは限らない。そこで、推計にあたっては、一定の演算周期 t_p で処理を繰り返すことで、LFC のリアルタイム動態を正確に把握する必要がある。

LFC の計算においてはリミッターと不感帯が設けられているため、情報の欠落によって推計が失敗することがあり得る点には注意が必要である。推計の失敗が起こると、推計 LFC 指令は元の指令から大きく外れる恐れがあるため、推計エラーが発生した場合にはこれを検知して取り除く必要がある。さらに、制御方式は生成した推計 LFC 指令と遅延指令との乖離の程度を確認する機能を備えている必要がある。制御方式の自己評価プロセスを式 (5) に示す。

$$u = \sum t_p |LFC_{estimated} - LFC| - \sum t_p |LFC_{delayed} - LFC| \quad (5)$$

式 (5) の評価値 u が負の値を取るのは、ある推計期間 t_p において、制御方式によって推計された LFC 指令の方が遅延指令に比べ、元の指令に近い場合である。この場合、推計結果は信頼に値するといえる。一方で、 u が正の値を取る場合には、推計指令は遅延指令より優れているとはいえない。

本提案書で提案する制御方式全体のロジックを図 7 に示す。時間 t_0 に、新たな推計プロセスが実行されることとなっている。伝達遅延があるため、時間 t_0 に受信した LFC 指令は、実際には時間 t'_0 における LFC 指令といえる。したがって、推計には Δt_{-1} における周波数偏差のデータを用いることとした。

もし LFC 構成やパラメータが不変であれば、その動態は一定となる。言い換えるなら、式 (3) における極および零点はあまり変化しない。極および零点は係数から容易に求められる。もし式 (3) の極が z 平面の単位円の外にある場合、推計された $E(z)$ は不安定であり、この結果は使用すべきではないため、この場合には逸脱データの代わりに、一つ前に推計した時間 Δt_{-2} におけるデータを使用することとする。

さらに、極および零点が一つ前の推計とあまりにかけ離れている場合も、推計結果は逸脱データとして扱い、一つ前の結果を代わりに用いることとした。式 (6) または式 (7) が真で、かつ、推計値がかけ離れている場合には式 (3) における動態を攪乱する恐れがあると評価する。ここで、 z_1 、 z_2 および p_1 、 p_2 が Δt_{-1} に、 z_1^- 、 z_2^- および p_1^- 、 p_2^- が Δt_{-2} における極および零値である。

$$\min\{|z_1 - \tilde{z}_1| + |z_2 - \tilde{z}_2|, |z_1 - \tilde{z}_2| + |z_2 - \tilde{z}_1|\} \geq 0.1 \quad (6)$$

$$\min\{|p_1 - \tilde{p}_1| + |p_2 - \tilde{p}_2|, |p_1 - \tilde{p}_2| + |p_2 - \tilde{p}_1|\} \geq 0.1 \quad (7)$$

続いて、式 (5) を用いて、推計された LFC 指令を EV 制御に使用すべきかを評価する。 Δt_{-1} における動態の推計値は Δt_{-2} における値に近い等しいはずであることを考えると、 Δt_{-2} における推計結果が Δt_p において良好であれば、推計 LFC 指令は信用できるといえる。一つ前の推計が良好でない場合には、遅延指令が適用される。

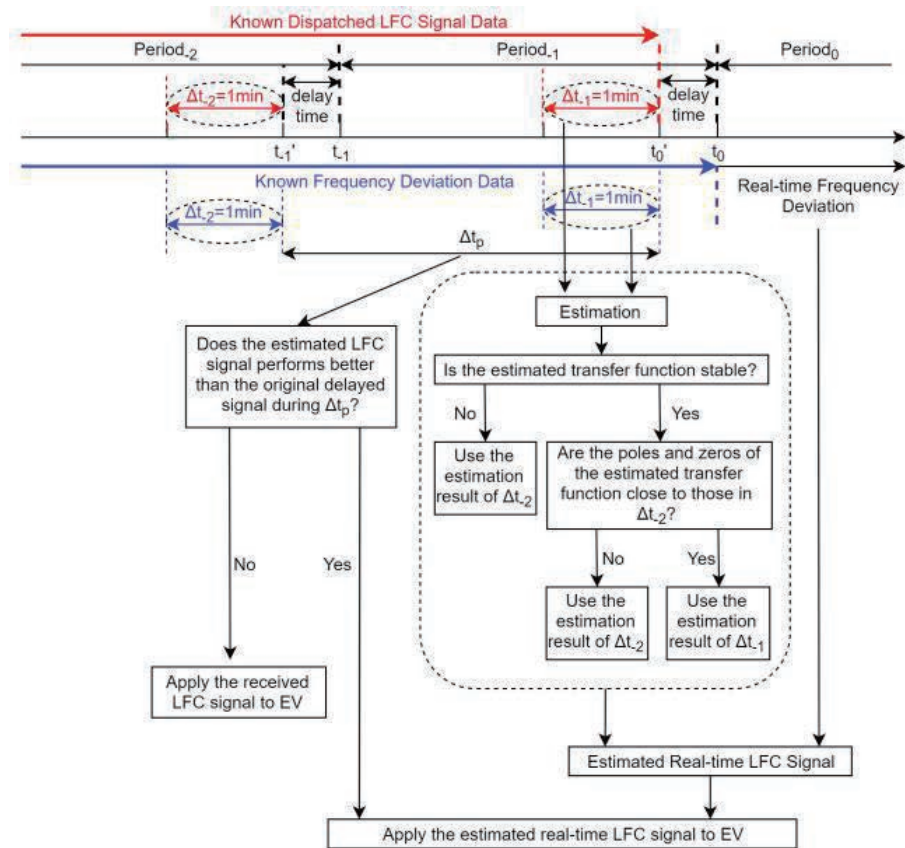


図7 提案システムにおける制御構造

自己評価プロセスにおいて、一つ前の推定結果を用いて最新の推計結果の評価を行い、当該推計結果を使用するかを決定する方式を取っているのは、性能は評価プロセスを経るまでは知りようがないためである点には、留意が必要である。場合によっては、一つ前の推計結果の方に問題があるために、最新の推計結果が正しいに関わらず、これを適用しないという判断がなされる場合がある。しかしながら、このような評価の失敗は頻繁に起こるものではなく、また真の系統LFCの動態も、演算周期数回分以内に把握できる。また、系統におけるLFCのパラメータは比較的变化しにくいと、ひとたび優良な推計結果を得ると、その効果は長期間にわたって持続する。最悪の場合でも、遅延LFC指令を適用しても大きな問題は生じないといえる。以上をまとめると、上述の制御ロジックを用いれば、期せずして推計に誤りが生じることはあっても、これがEVAのパフォーマンスを低下させることはなく、提案制御方式はパフォーマンスを最大限に引き出す方向に作用するものといえる。図8に、提案の制御方式を実装したEVAのモデルの図を示す。

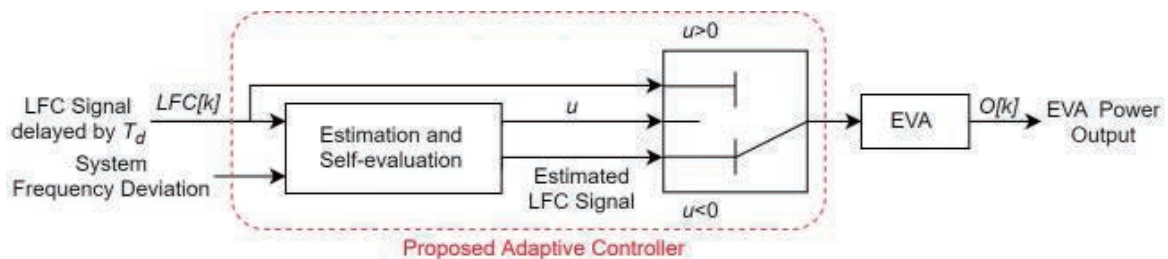


図8 提案の制御方式を実装したEVA

4. 提案制御方式によるシミュレーション結果

シミュレーションは、文献[17]の第二ケースの例に基づいて実行した。シミュレーション時間は11:00から14:00までの3時間とした。Aエリアは、提案制御方式が対象としているFFC方式で運用されているエリア、BエリアのLFC方式は連系線潮流バイアスを維持するためにTBC方式で運用されているとした。AエリアのLFCのPI制御パラメータは、提案制御方式による系統のLFC動態への追従性能を確認するために、値が変更されるよう設定した。具体的には、12:00に積分ゲインは元の値の70%となり、その後13:00に比例ゲインが元の値の倍になるとした。

提案制御方式の評価には、主にパフォーマンススコアを用いることとする。PJMでは、市場における各周波数調整リソースが、どの程度素早くLFC指令に追従できたか、過去の実績を評価してパフォーマンススコアを算出している。このパフォーマンススコアによって、市場における報酬額と競争力が決定される。本提案書において、パフォーマンススコアはPJMの方式に近い方法で計算した[15]。パフォーマンススコア S は、確度スコア A 、遅延スコア D 、精度スコア P の相加平均として計算される。

$$S = \frac{1}{3}A + \frac{1}{3}D + \frac{1}{3}P \quad (8)$$

計算には、EVAの出力 $O[k]$ と系統の中央給電指令所から出される元のLFC指令 $LFC[k]$ を用いた(図8)。 $O[k]$ 、 $LFC[k]$ はどちらも同じサンプル時間のものである。確度スコア A は、各遅延時間において $LFC[k]$ と $O[k]$ の相関係数が取り得る最大値から計算される。

$$A = \max \{R(O[k], LFC[k]), R(O[k+1], LFC[k]), \dots, R(O[k+n], LFC[k])\} \quad (9)$$

ここで、 $R(a, b)$ は a, b の相関係数、 n は自然数を指す。

遅延スコア D の計算には、確度スコアが最大となる n_0 における遅延が用いられる。遅延スコアは、遅延時間と5分間との比率を1から引き算した値である。

$$D = 1 - \frac{T_s \cdot n_0}{5 \times 60} \quad (10)$$

精度スコア P の計算には、EVAの出力 $O[k]$ と元のLFC指令 $LFC[k]$ との間の瞬時誤差の平均と平均調整容量 $\overline{C_{kw}}$ の比率を1から差し引いた値として計算される。

$$P = 1 - \frac{\overline{O[k] - LFC[k]}}{\overline{C_{kw}}} \quad (11)$$

パフォーマンススコアを含め、全てのスコアは0から1までの割合で表わされる。パフォーマンススコアが高くなるほど、その周波数調整技術は系統運用者から落札しやすくなり、市場からより多くの報酬を得られる。米国内では他の系統運用者も似たような評価方式を採っている。ただし、PJMは事実上、通信ネットワークにおける10秒の待ち時間を認めている点には注意が必要である[15, 26]。実際のPJM市場では10秒までの遅延はペナルティとはならないため、PJM方式に従う限りにおいて、提案制御方式の優位性は限定的となる恐れがある。しかし、本提案書では、10秒以内の遅延であっても周波数制御のパフォーマンスに影響する以上、10秒以内の遅延も改善すべきと考える。したがって、今回のケーススタディでは、PJMのスコア制度よりもより詳細に、10秒以内の遅延も考慮することとした。特に遅延の影響という観点から調整リソースを評価する場合には、明快で公平な方法と考え、本ケーススタディではこのような方針を採用することとした。提案の制御方式は、周波数の安定のために、系統運用者によって遅延に対してよ

厳しい基準が採用されている市場への導入を目指すものである。

LFC 指令の伝達から生じる完ぺきな遅延信号（遅延があるのみでそれ以外の誤差が全くない信号）は、理論上、周波数調整技術の精度スコアおよび遅延スコアにのみ影響を及ぼすことは、その定義から明らかである。さらに、20 秒以下の遅延においては、遅延スコアに及ぼす影響は非常に小さい。遅延によるパフォーマンススコアの低下は、主に、精度スコアの低下に起因するといえる。

続いて、提案の制御方式の系統全体への影響を検討するために系統の周波数偏差の二乗平均 (RMS) についても検討した。文献 [16] によると、中央給電指令所と調整リソースの間には 3 秒の遅延が存在する。同等の遅延が、中央給電指令所と EVA の間にも存在すると考えられる。本シミュレーションでは、EVA 内で 0 秒、5 秒、10 秒の三通りの遅延が起こるケース、言い換えると、トータルでの遅延時間が 3 秒、8 秒、13 秒となるケースを検討した。推定遅延時間 T_d' は 3 秒、8 秒、13 秒と設定したが、実際の遅延時間 T_d は T_d' の 80% から 125% までの間でランダムに変化する様々な値を取り得る。このような前提下での各ケースにおけるパフォーマンススコアの結果を図 9 から図 12 に示す。

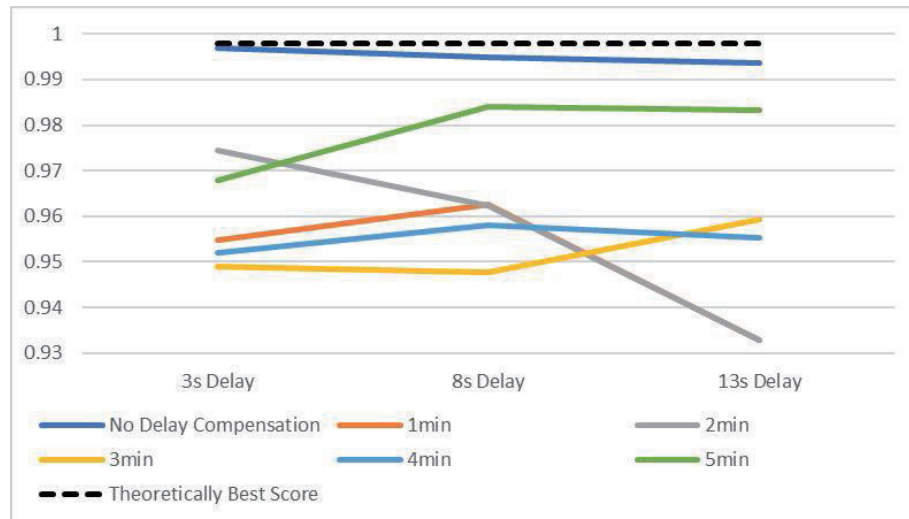


図 9 確度スコア

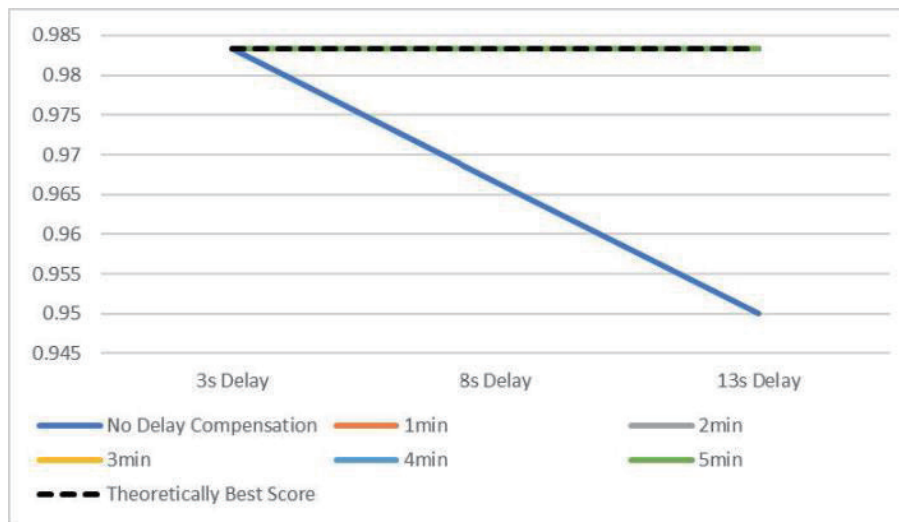


図 10 遅延スコア



図 11 精度スコア

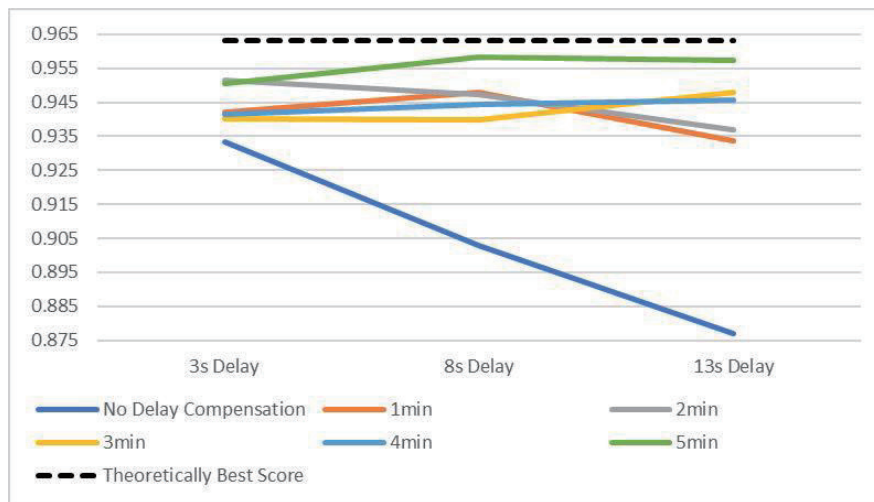


図 12 パフォーマンススコア

図中、1 分から 5 分までの数字は演算周期 (t_p) である。参考までに、パフォーマンススコアが理論上取り得る最良の値を黒の破線で示す。LFC 伝達において、遅延が生じなかったケース ($T_d=0$) がこれに該当する。スコアの理論値が 1 に満たないのは、蓄電池の充放電には一定の時間がかかるためである。

確度スコアでは、提案の方式は遅延指令によるケースより劣る結果となった。これは、確度スコアには遅延の影響が考慮されないためである。確度スコアは、LFC 指令と EVA 出力の間で（グラフの）波形がどれだけ近いかの指標とみなすことができる。純粋な遅延指令は、遅延ゼロの時と波形自体は同じ形となるが、推計される指令には数値誤差が含まれる。しかし、提案の制御方式によるスコアは最悪のケースでも 0.93 を上回っており、推計 LFC 指令は元の LFC 指令の動態を概ね再現しているといって差し支えないといえる。遅延スコアのグラフは、元の LFC 指令と EVA の出力のギャップを提案制御方式によって補償することに成功したことを示している。しかし、上述したように、遅延スコアにおける遅延の影響は非常に小さい。13 秒の遅延が起こったケースにおいても、遅延スコアは約 0.95 には達している。

本提案方式の効果が最も明確に発揮されるのが、精度スコアである。精度スコアは LFC 指令と EVA の出力間の乖離している面積の割合であるため、遅延からくるギャップにより、大きな誤差が引き起こされる。式 (11) によると、精度スコアは調整リソースが提供できる調整容量に依存する。EVA の調整容量は従来の発電所に比べると小さいため、調整指令と出力のミスマッチが小さくてもパフォーマンススコアは悪化する。特に、調整指令が大きく変動した場合には、小さな遅延でも大きなミスマッチが生まれる。

このため、EVA の精度スコアは遅延の影響をより一層受けやすくなり、補償がない時には非常に低いものとなる。精度スコアは、13 秒遅延ケースで 0.7 にまで低下する。提案制御方式を適用することにより、精度スコアは、遅延時間に関わらず、0.9 程度にまで上昇する。

各々の遅延時間において、トータルのパフォーマンススコアは改善された。遅延時間が長くなるほど、提案制御方式のメリットは大きくなった。システムの安定性の面でも、図 13 に示される周波数偏差は、本提案方式によって抑制することができる。また、図 14 により、周波数偏差の最大値は、式 (5) の已評価プロセスにおける誤差によって悪化することはないと分かる。

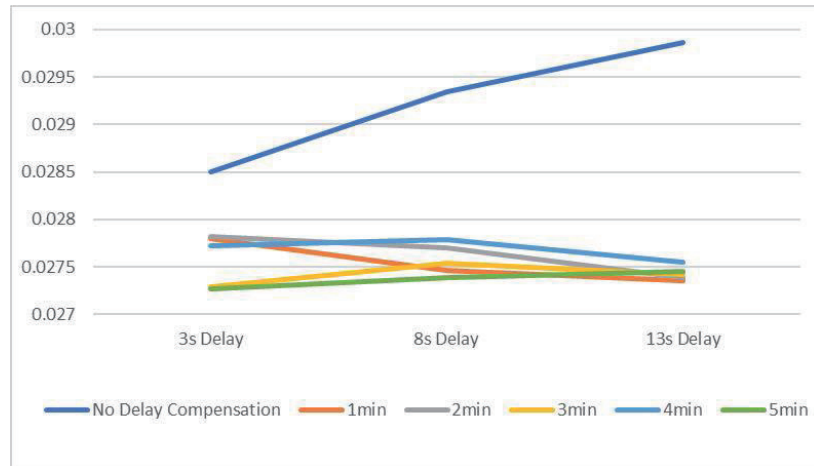


図 13 周波数偏差の二乗平均 (Hz)

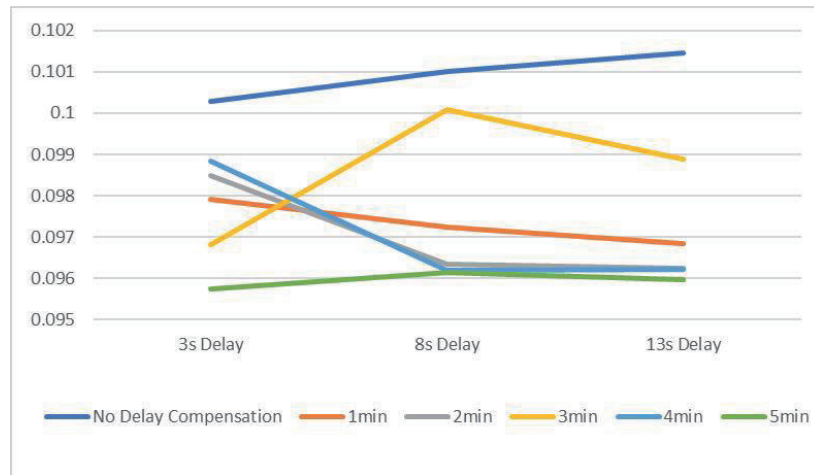


図 14 周波数偏差の最大値 (Hz)

演算周期 t_p を短く取った場合の方が、LFC 動態をより密に補足し追従できる反面、演算回数が増えることによる推計データの逸脱が生じやすくなると考えられる。この一方で、演算周期 t_p を長く取った場合には、データは安定しやすくなる反面、ひとたび逸脱が起こるとその影響が長く続くこととなる。このため、どの演算周期 t_p がパフォーマンスの向上にとって最適であるかはリアルタイムの系統の状況によって変わってくるため、結論を出すのは困難である。

しかし全体としては、演算周期 t_p の値に関わらず、補償を行わなかった場合と比べてパフォーマンスは向上した。本提案方式のパフォーマンスをより詳細に検討するために、演算周期 t_p が3分、遅延時間が8秒のケースのシミュレーション結果を図15に示す。本提案方式で制御されたEVA出力（黄色線）は、LFC指令がEVAの容量を超過した場合を除き、元のLFC指令（青線）とほぼ完全に一致した。赤線が、遅延したLFC指令に基づいて出力を制御した場合で、パフォーマンススコアを低下させる、元の指令との乖離が容易に見て取れる。

図16に、LFCシステムの比例ゲインが、元の値の2倍に変更されたケースを示す。このような変更が突然起こった直後には、提案方式によって制御されたEVAの出力（黄色線）と、元のLFC指令（青）の間には大きな乖離が生じる。その後、提案制御方式は元の指令からの逸脱を検

知し、追従する指令を推計値から元の遅延指令に切り替える（黄色線が赤線に重なる）。 t_p が経過した後、提案制御方式は、再度推計データを成功データと認識し、追従するデータ推計データに切り替え直すこととなる。

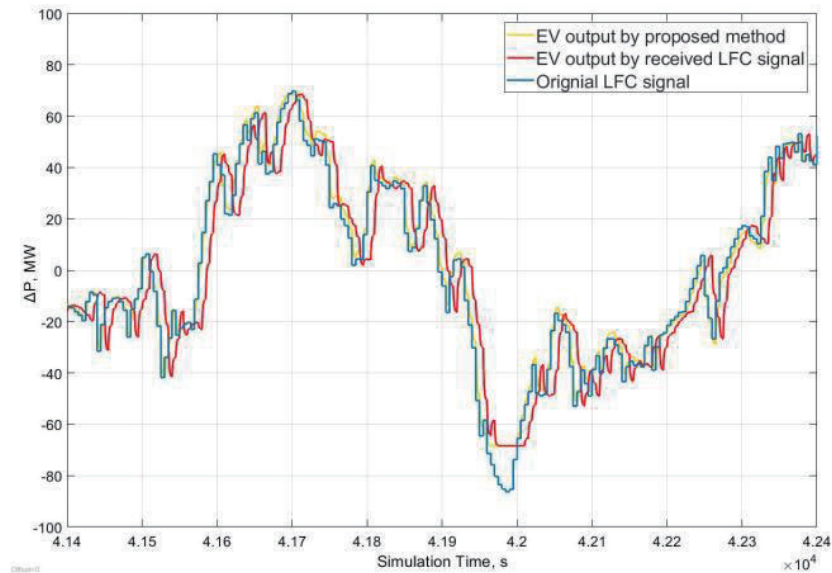


図 15 指令の比較（通常の運用時）

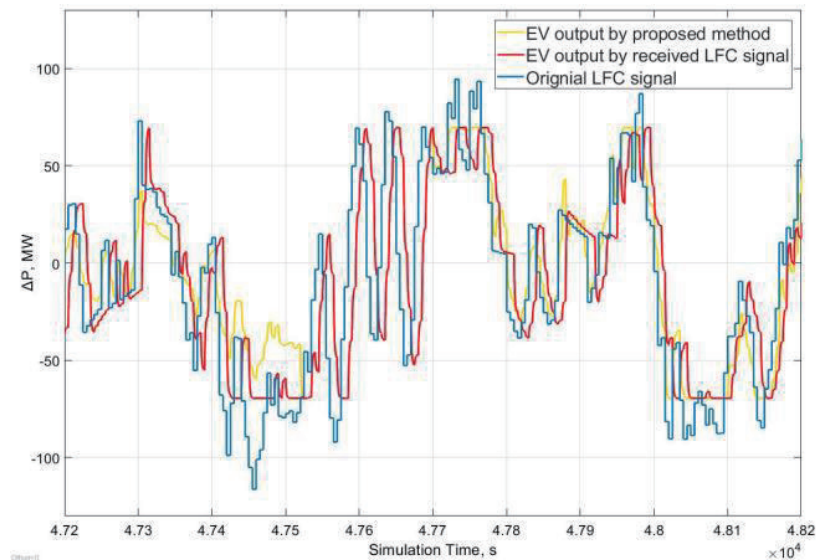


図 16 指令の比較（比例ゲイン変更時）

図 17 に、式 (5) の計算結果を示す。制御方式では、3 時間のシミュレーション中で 3 回、 t_p にして 5 回分のデータに信頼性の低い推計結果が返されたことがわかる（グラフ中、正の値）。3 回のうち、最初と最後は PI 制御のパラメータ変更に伴うものであった。提案制御方式では推計が成功する確率は高く、また $2t_p$ 以内には速やかに正確な推計に戻ることが分かった。

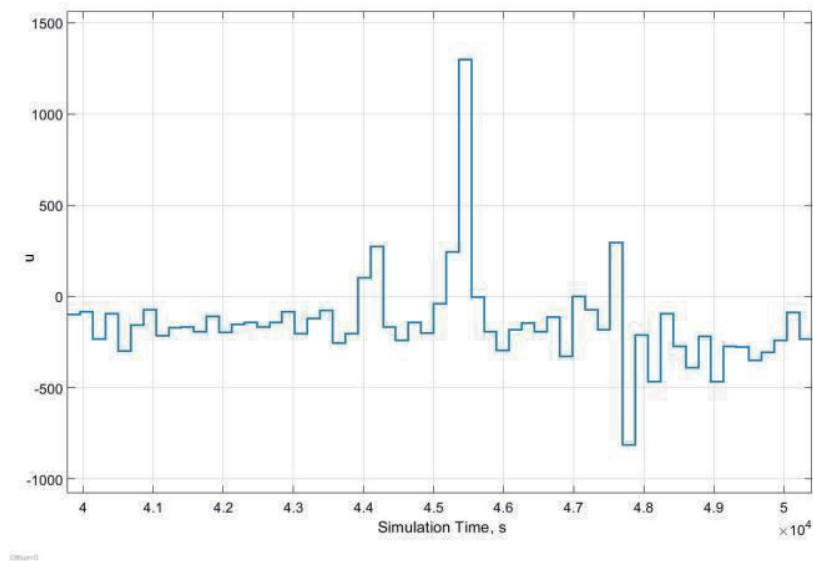


図 17 u の計算結果

5. 結論

5.1 本提案書の結論

本提案書では、EVA が LFC の通信遅延を補償するための、適用可能な制御方式を提案した。提案の制御方式は、FFC 方式を採用している系統下で EVA のパフォーマンスを向上することを目的として設計したもので、EVA からの出力を系統の中央給電指令所から送られる LFC 指令に精度よく追従させることが可能である。提案制御方式は、系統の周波数偏差の抑制に貢献するため、系統全体にもメリットをもたらす。本方式は、周波数制御市場において EVA がより多くの落札の機会と報酬を得るための一助となるはずである。

5.2 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持っており、ここで検討しているシステムを将来的には社会実装する意思があると考えられる。しかし、周波数調整市場が日本において開設されるのは 2024 年頃とされており、現状では制度設計と小規模の実証実験の段階にあるといえる。一方、周波数調整市場が既に開設されている米国ないし欧州では、既に EV を用いた周波数調整市場への参入を視野に置いた実証が行われている。それでも、EV の集合運用による実際のビジネスモデルとして成立している事例は見当たらない。これは、EV による周波数制御を事業として成立させることが難しいことの証左ともいえる。

したがって、政策面への提案としては、まずは EV による周波数制御技術のシミュレーションと実証実験を段階的にスケールアップしながら積み重ねていくことである。次に、周波数調整市場の制度設計については、先行する PJM や CAISO をはじめ、欧米諸国の制度の長所・欠点を分析し、わが国として、EVA の参入障壁を低くするとともに、周波数制御の安定性を維持するバランスを考慮した制度設計を行う必要がある。そのためには、周波数調整市場の制度に関する幅広い分析・研究も続けていくことが望ましく、電力広域的運営推進機関（OCCTO）においてもこうした研究の成果を実際の制度設計に反映させていくことが望まれる。

一点、具体的な政策・制度の提案として言えることは、周波数調整市場の最低入札量に関するものである。本提案書の表 1 にある調整力の分類の中で、負荷周波数制御に該当するのは二次①である。表 1 より、この二次①調整力の最低入札量が 5 MW となっているのが見て取れる。仮に

EVのアグリゲートにより、5 MWの容量を確保するには、何台必要かを考えてみる。緩速充電の場合、一台当たりの消費電力は3~4 kWである。単純に考えても1,300台~1,700台程度のEVが必要となる。もちろん、アグリゲートしているEVの全台数を負荷周波数制御に利用できるわけではない。周波数制御に参画している時間帯でも、走行中のEVは制御に用いることはできない。この必要な時間帯に制御に利用できない（走行中の）EVがあることを考慮すると、二次①の調整力市場の入札に参加するためには、3,000台以上のEVをアグリゲートしておく必要があると推定される。これだけの台数のEVを集めることは容易ではない。さらにいえば、中央給電指令所から負荷周波数制御のための信号を受け取ったEVAが、数千台のEVの制御への利用可能性を常に把握し、一台毎の搭載蓄電池のSOC（充電状態）も把握して各EVへの充放電電力を決定し、ネットワークを通じて信号を送り、制御することも容易ではない。したがって、二次①調整力における5 MWの最低入札量は、EVAが日本の負荷周波数制御に参加するためには高すぎる障壁である。

これに対し、例えばPJMにおいては、負荷周波数制御の市場に参加するための最低入札量は0.1 MWである。米国のPJMと比較して、日本の負荷周波数制御の市場における最低入札量が高くなる理由は二つ考えられる。一つには、利用できる台数が常に変化し、一台当たりの充放電電力の小さいEVに対する信頼性が高くなく、周波数制御全体に悪影響を及ぼすことが懸念されている可能性があることである。もう一つは、市場を管理する送配電事業者にとって、一事業当たりの規模が小さいものを扱うのは、手続きコストが嵩むためである。

第一の理由についてみると、少なくとも周波数調整市場が発足して数年間は、EVAのような事業者の参加総量は小さいと推定される。これは、先行するPJMやCAISOを見ても明らかであり、負荷周波数制御の大部分は従来の火力、水力の出力変動によっている。したがって、EVAの参入によって制御そのものが不安定になるリスクは殆どないと考えられる。第二の理由についていえば、確かに容量の小さい事業者が、数多く周波数調整市場に参加すれば、系統を管理する送配電事業者にとっては、作業が煩瑣となり、手続きコストが嵩むことは間違いない。ただ、二次①の市場に限らず、調整力提供資源としてのEVに対する期待は大きい。少なくとも市場が成熟するまでは、二次①調整力の最低入札量をPJM並みに小さくすることは、今後のEVの調整力市場への参加のためには重要な施策であると考えられる。

参考文献

- [1] Sinan Cai and Ryuji Matsuhashi, “A Control Method for Compensating Communication Delays in Load Frequency Control with Electric Vehicle Aggregators”, Journal of Society for Energy and Resources, Vol. 41, No. 1, pp. 1-10, 2020, https://doi.org/10.24778/jjsr.41.1_1.
- [2] H. Liu, Z. C. Hu, Y. H. Song and J. Lin, “Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands”, IEEE Trans. Power Syst., 28-3(2013), pp. 3480-3489.
- [3] W. Kempton, V. Udo, K. Huber, K. Komara, S. Letendre, S. Baker, D. Brunner, and N. Pearre, “A test of vehicle to grid for energy storage and frequency regulation in the PJM system”, Publication of MAGICC, 2008.
- [4] S. Han and S. Han, “Economic feasibility of V2G frequency regulation in consideration of battery wear”, Energies, 6-2(2013), pp. 748-765.
- [5] Order No. 755, “Frequency regulation compensation in the organized wholesale power markets”, FERC.gov, Apr. 2016.
- [6] PJM manual 11, “Energy & ancillary services market operations”, 2015.
- [7] J. J. Escudero_Garzas, A. Garcia-Armada, and G. Seco-Granados, “Fair design of plug-in electric vehicles aggregator for V2G regulation”, IEEE Trans. Veh. Technol., 68-8(2012), pp. 3406-3419.
- [8] “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”，電力広域的運営推進機関（OCCTO），2019.
- [9] A. Brooks, and T. Gage, “Integration of electric drive vehicles with electric power grid - a new value stream”, 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2001.
- [10] A. Aldik, A. T. Al-Awami, E. Sortomme, A. M. Muqbel, and M. Shahidehpour, “A planning model for electric vehicle aggregators providing ancillary services”, IEEE Access, 6(2018), pp. 70685-70697.
- [11] I. S. Bayram and I. Papapanagiotou, “A survey on communication technologies and requirements for Internet of electric vehicles”, EURASIP Journal on Wireless Communications at Networking, 1(2014).
- [12] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti, “The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges”, Comput. Commun., 36-17(2013), pp. 1665-1697.
- [13] 戸田英邦, 太田豊, 中島達人, “電気自動車を用いた電力系統周波数制御の実証試験”, 電気学会研究会資料, TER, IEE Japan, 54 (2017), pp.37-41.
- [14] 戸田英邦, 太田豊, 中島達人, “複数台の電気自動車による V2G 制御の実装と検証”, 電気学会研究会資料, TER, IEE Japan, 72 (2018), pp.13-17.
- [15] PJM manual 12, “Balancing operations”, Revisions:39, 2019.
- [16] K. S. Ko, S. Han, and D. K. Sung, “A new mileage payment for EV aggregators with varying delays in frequency regulation service”, IEEE Transactions on Smart Grid, 9-4(2018), pp. 2616-2624.
- [17] 電力需給解析モデル標準化調査専門委員会；電気学会技術報告第 1386 号, 2016.
- [18] 電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御調査専門委員会, “電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御”, 電気学会技術報告, 869 号 (2012), pp.1-147.
- [19] K. Shimizu, T. Masuda, Y. Ota, and A. Yokoyama, “A new load frequency control method in power system using vehicle-to-grid system considering users’ convenience”, 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm, Sweden, 2011.
- [20] K. Wada, A. Yokoyama, S. Kawauchi, and F. Ishikawa, “Frequency control using fast demand response in power system with a large penetration of renewable energy sources”, International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014.
- [21] 山本有途, 松橋隆治, “電気自動車を用いた電力系統の負荷周波数制御の分析とその経済性評価”, 第 32 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2016.

- [22] K. Warwick, and D. Rees, “Industrial Digital Control Systems”, IET, 1998.
- [23] H. Fan, L. Jiang, C. Zhang, and C. Mao, “Frequency regulation of multi -area power systems with plug-in electric vehicles considering communication delays”, IET Generation, Transmission & Distribution, 10-14(2016), pp.3481-3491.
- [24] C. Zhang, L. Jiang, Q. H. Wu, Y. He and M. Wu, “Delay-dependent robust load frequency control for the time delay in power systems”, IEEE Transactions on Power Systems, 28-3(2013), pp. 2192-2201.
- [25] C. Zhang, L. Jiang, Q. H. Wu, Y. He and M. Wu, “Further results on delay-dependent stability of multi-area load frequency control”, IEEE Transactions on Power Systems, 28-4(2013), pp. 4465-4474.
- [26] Regulation Market Issues Senior Task Force, Performance Scoring, 2016.

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

電気自動車を活用した負荷周波数制御の
通信遅延補償のための制御方式の提案

令和3年7月

Proposal of Control Method for Compensating Communication Delay
in Load Frequency Control Using Electric Vehicles

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2021.7

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
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2021 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。