

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04435

研究課題名(和文) 間欠性出力電源主体の電力システムを安定化させる需要側電力調整資源の量子化制御理論

研究課題名(英文) A Theory of Quantized Control of Demand Side Energy Resources to Stabilize Intermittent Generator-Based Electric Power Systems

研究代表者

齋藤 浩海 (Saitoh, Hiroumi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10202079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光・風力発電が主体となった将来の電力システムでは、出力を制御できる電源の減少に伴い需要と供給を一致させる周波数制御の能力が低下するため、それを補う負荷制御が重要になる。本研究の目的はこの負荷制御の効果を高めるため動的量子化器を応用した自律分散型負荷制御の有効性を明らかにすることである。計算機シミュレーションにより、動的量子化器の特性を持った負荷制御の有効性と課題を明らかにした。関連して、負荷制御に利用可能な電気機器の潜在量をアンケート調査により推定を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力システムにおける負荷制御は、需要家所有の空調機などの電気機器を対象に、その消費電力を離散的に変更する。そのため、消費電力の変更の仕方によっては電力システムに対する擾乱となり、逆効果となる。この逆効果を発生させず、周波数変動の抑制効果を向上させ得る方法として、動的量子化器の制御理論の応用可能性を示した点が本研究成果の学術的意義である。また需要家を対象としたアンケート調査により負荷制御に利用可能な電気機器の潜在量を推定した点は、今後の電力システムの安定運用に役立ち、社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)： In future electric power systems including a lot of PVs and wind power generators, the ability of frequency control for balancing supply and demand deteriorates because of the decrease of generators being able to control their outputs. Therefore, load control becomes important to compensate for the ability of frequency control. The purpose of my study is to clarify the effectiveness of the application of a dynamic quantizer to autonomous decentralized load control for enhancing compensation. The results of simulation studies showed that the dynamic quantizer is effective to enhance the ability of frequency control, but it creates a new challenge. In addition, the potential electrical appliances available for load control were investigated with a questionnaire.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電力システム 負荷制御 量子化器 周波数制御 マルチエージェント

1. 研究開始当初の背景

気象に依存して出力が間欠的に変動する太陽光・風力発電(間欠性出力電源)を主体とした将来の電力システムでは,出力が可制御な火力発電などの電源が減少するため,周期 20 分以下の需要と供給の不均衡を解消する周波数制御 LFC の能力が低下し,周波数変動を増大させて電力システムを不安定化させる危険性がある。これを防ぐ方策に,需要家所有のヒートポンプ給湯器など,小規模負荷機器(需要側電力調整資源)の消費電力を周波数変動に比例させて調節する負荷制御がある。この負荷制御の理想特性は,すべての需要側電力調整資源の消費電力変化 L_c を基準周波数(50 または 60Hz)からの変化 f に比例させて連続的に増減させる特性である(図 1 中の破線)。しかし現実的には,図 2 のように需要家単位で設置した需要家エージェントという制御器により離散的電力調整が行われ,図 1 中の実線の階段特性が実現され得ると考えられる。この階段特性を多数の需要側電力調整資源を用いてどのように構成するのか,また階段特性を用いて周波数変動抑制効果を向上させる最適な制御方法は何か,という学術的問いが生じる。また需要側電力調整資源を複数のグループに分け,各グループに割り当てる周波数変化しきい値を固定化すると,負荷制御用の消費電力量に関してグループ間で不公平さが生じ得る。そこで各グループの消費電力調節量を公平にするため,周波数変化しきい値の割り当てをどのように柔軟に変更すれば良いのかという問いも生ずる。

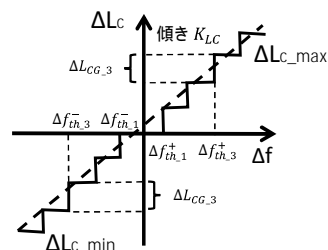


図 1 負荷制御の特性

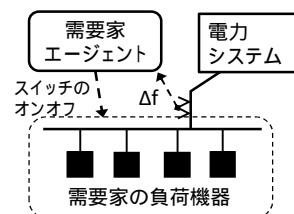


図 2 個々の負荷制御機構

2. 研究の目的

本研究では,次の具体的な課題に取り組むことで,前述した学術的問いに対する解決方法をの考案を目指す。

- (1)需要側の電力調整資源の潜在量を文献や既存の統計調査結果およびアンケート調査により推定する。また電力調整資源グループの消費電力変更可能量を情報通信により同時制御可能な負荷機器数から推定する。
- (2)複数の電力調整資源グループを分散制御するエージェント群の動作が,結果として負荷制御の階段特性を実現するためのエージェントの制御機構を考案する。その際,動的量子化器の応用を試みる。
- (3)電力調整資源である負荷機器の摩耗等の観点から,負荷機器を公平に利用するための自律分散型の制御原理を,実規模電力システムモデルを用いて明らかにする。

3. 研究の方法

(1)需要側電力調整資源の潜在量の推定

需要側電力調整資源の量を推定するため,産業部門については文献や既存の統計調査結果などを利用し,一般家庭については郵送によるアンケート調査を行う。アンケート調査では,需要家所有の負荷機器や負荷制御に対する受容性,家族構成,電力システムに関する知識の有無,事業内容などを質問するので,個人の特定や事業の妨げが無いように,十分に配慮してアンケート調査の質問事項の作成・郵送・回収を行う。またアンケート調査結果の分析終了後に,回収した調査用紙を個人情報特定されないように速やかに処分する。

(2)動的量子化器を応用した負荷制御の原理

これまで研究代表者が研究してきた静的量子化器に相当する階段特性の負荷制御では,十分な周波数変動抑制効果が得られなかった。この解決方法として,負荷制御の階段特性に動的量子化器を導入する方法を考案する。そしてその有効性を東北地域の電力システムモデルを用いて検証する。

(3)需要側電力調整資源の利用公平性を考慮した自律分散型負荷制御の原理

電力調整資源グループの消費電力変更を引き起こすための,周波数変化のしきい値が小さいほど,負荷機器のスイッチングが頻繁になり,機器の摩耗と機器故障の発生確率を増大させるためグループ間で不公平が生じる。研究代表者はこれまで,この不公平性を解消するため,平均合意アルゴリズムと回帰モデルを用いて,各グループに割り当てられたしきい値を,そのグループを制御するエージェントが自律的に入れ替える方法を研究してきている。この入替法の有効性を現実的なグループ数の場合について検討する。特にグループ間の通信遅延問題の解決法,動的量子化器がエージェントに組み込まれた時の有効性,回帰モデルよりも高性能化が期待できる機械学習の応用可能性などを,実規模電力システムモデルを用いて明らかにする。

4. 研究成果

(1) 需要側電力調整資源の潜在量の推定

小規模需要の一般家庭にどの程度の調整力が潜在しているのかを推定するため、需要側調整資源に関するアンケートを実施した。ここではアンケート結果の一部であるエアコンに関する回答を整理・考察した内容を記載する。

調査の目的と調査方法

小規模な低圧需要家がどのくらいの経済メリットを得られれば調整力を提供し得るのか、そして調整力資源となり得る空調機や電気給湯機が系統運用機関等により自動的に制御される場合、それらの機器の設定値をどのくらい変更されても構わないと考えるのかを明らかにすることを目的とする。

低圧需要家が所有する空調機と電気給湯機の使用状況のデータを、郵送した質問票に回答してもらう方法で収集した。郵送先の選定は、研究代表者の所属する大学の所在地である宮城県仙台市青葉区の住人から、住民基本台帳を閲覧することにより行った。選定では、電気給湯機を所有し、場合によっては太陽光発電装置や電気自動車を所有している需要家を想定したので、集合住宅を除く一戸建と思われる住人を住所から判断して選定した。また、一戸建の所有者はある程度の年齢以上の年代であると推定し、30歳台以上の住人600人を無作為に選んだ。

質問票を選定した住人に一齐に郵送した日は2021年3月23日であり、その回答を返送してもらう期限を同年4月30日に設定した。返送されてきた質問票は164通であり、回収率は約27.3%であった。

質問票では、はじめに電力システムの全体像、調整力不足を補う手段の一つとしてのDR（需要応答）調査の目的を説明した。また、調整力を提供し得る具体的な電気機器として、空調機、電気給湯機、蓄電池（PV併設用など）電気自動車またはプラグインハイブリッド自動車の対象になり得ることを示した。以下に質問の概要を述べる。なお質問の形式は、可能な限り選択肢から選択する方式にした。

（質問1）回答者の年代、同居人数、契約電力、夏季・冬季の1カ月の電気料金の平均など

（質問2）調整力資源となる電気機器のそれぞれの所有台数、定格出力、メーカー・型番

（質問3）電気機器を調整力資源として提供できる場合に同意できる電気料金の最小割引率

（質問4）系統運用機関等から調整力資源として電気機器の利用要請があった場合に関する質問として、空調機の冷暖房時の平均設定温度、受け入れ可能な設定温度の最大変更幅、設定温度変更の受け入れ可能な最短の時間間隔、設定温度の自動変更を許容できる時間帯とその時間帯における継続時間、電気給湯機の平日1日あたりの使用湯量、平日の湯の沸き上げ完了時刻、系統運用機関等によって変更されても受け入れ可能な沸き上げ完了時刻など

調査結果と考察

回答者数を年代別に見ると30歳代から50歳代までは各年代とも約35人と同程度で、60歳代が46人と最も多く、70歳代が10人と最も少なかった。また、電気の契約容量と同居人数に正の相関があること、冬季の平均電力料金の分布は夏季の分布より高い方へ移動していること、空調機の所有台数の分布は平均2.87のポアソン分布で近似できること、調整力の提供の対価として設定される電気料金の割引率が9%であれば回答者の約80%が調整力を提供する可能性があることなど、回答者の電気利用や調整力の提供に関する基本的な特徴を把握できた。

また調整力提供のために空調機設定温度を変更する場合、許容される最大変更幅の回答者数は図3の分布となり、その累積度数分布から得られた図4から変更幅が ± 2 であれば約34%の回答者が空調機による調整力を提供可能であること、 ± 0.5 の場合は約96%の回答者が調整力を提供し得ることが分かった。さらに系統運用機関等が空調機の設定温度を自動的に繰り返し変更する際、その変更間隔について許容できる最短の間隔の回答を整理・分析すると、約18.3%の回答者からLFCの応答領域に対応できる調整力が得られる可能性のあることも分かった。

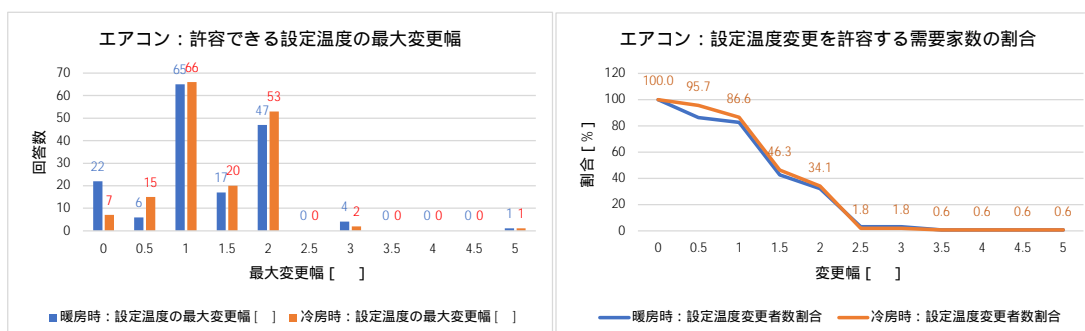


図3 許容できる空調機設定温度の最大変更幅 図4 設定温度の変更を許容する回答者割合

(2) 動的量子化器を応用した負荷制御の原理

研究代表者が検討している自律分散型負荷制御 (Autonomous Decentralized Load Control, ADLC) を簡単に述べると、需要側電力調整資源 (負荷機器) の各グループが割り当てられた周波数変化 f のしきい値を超えた場合に自律的に自身の消費電力を調節することで、電力システムの周波数変動を抑制する方法である。この ADLC を電力システムの周波数制御系全体から捉らえると、図 5 のように、負荷機器の消費電力を調節するフィードバック制御ループに、図 1 の階段特性すなわち静的量子化器が挿入されていると見なすことができる。この静的量子化器を、電力システムの周波数制御系の動特性を考慮できる動的量子化器に置き換えることで、周波数変動の抑制効果が向上するの否かを計算機シミュレーションにより検討した。

検討では、東北地域の電力システムに相当する規模の単独システムモデルを作成・使用し、負荷制御なし、理想的比例負荷制御、静的量子化器を用いた ADLC (SQ-ADLC)、動的量子化器を用いた ADLC (DQ-ADLC) の 4 ケースを比較した。図 6 と図 7 に周波数変動の時間波形を、表 1 にはその変動の標準偏差を示す。なお表中の数値は、ADLC が抑制対象とする 10 分よりも長い周期成分を抽出した時間波形から算出した値である。

図 6 と図 7 の時間波形からは、短周期変動成分が顕著なため DQ-ADLC の効果が判然としないが、表 1 の標準偏差を比較すると、ADLC が無い場合よりも対象周期成分の変動を抑制しており、その効果は理想的比例負荷制御と同等であることが分る。また SQ-ADLC と比較すると、負荷機器グループ数が減少して図 1 の階段特性が理想的比例負荷制御の滑らかな特性からかけ離れても、標準偏差はあまり増加しないので、DQ-ADLC の周波数変動抑制効果は負荷機器グループ数に依存しにくいと言える。

なお、図 6 と図 7 の時間波形からは判別しにくいですが、DQ-ADLC の短周期成分の変動は SQ-ADLC の短周期変動より大きく、その差は負荷機器グループの個数が少なくなるほど顕著である。この原因は、DQ-ADLC の場合、SQ-ADLC に較べてひんぱんに負荷機器をオンオフさせるためである。この短周期変動の発生を抑制することが今後の検討課題である。

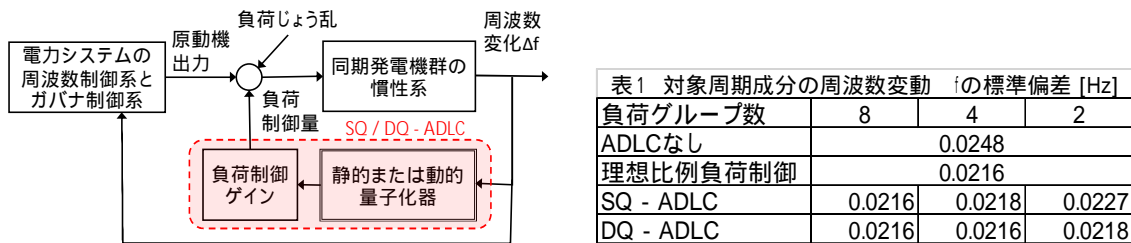


図 5 ADLC を含む電力システムの周波数制御系

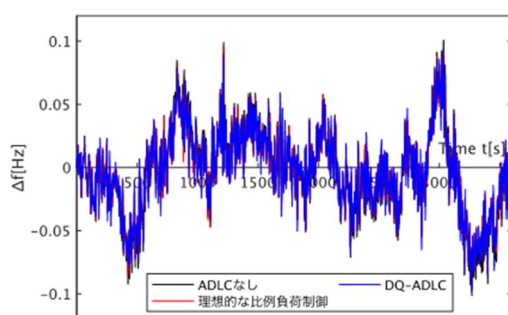


図 6 DQ-ADLC における周波数変動

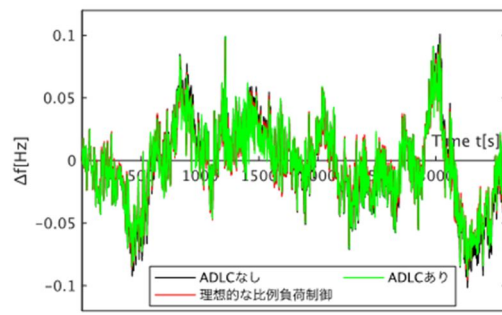


図 7 SQ-ADLC における周波数変動

(3) 需要側調整資源の利用公平性を考慮した自律分散型負荷制御の原理

研究代表者がこれまで開発してきた平均合意アルゴリズムと回帰モデルを用いた自律的な周波数変化しきい値の入れ替え方法 (以下、しきい値入替法) を、DQ-ADLC および SQ-ADLC に適用した場合と適用しない場合を検討した。負荷機器グループの個数を 4 とし、可制御でない負荷の正弦波形の変動 (周期 20 分) をじょう乱として与えたときの計算機シミュレーションの結果の一例を図 8 と図 9 に示す。なお、ここでのシミュレーションでは、(2) で述べた ADLC の負荷制御特性を変更しており、周波数変化 f の積分値に比例させて負荷機器の消費電力を調整している。

図 8 を見ると、しきい値入替法のある DQ-ADLC の場合、最も周波数変動が小さく、しきい値入替法の効果が高いことが分かった。また、4 つの負荷機器グループがこの周波数変動抑制のた

めに使用した負荷調整エネルギー E_c の時間推移(図9)を見ると、4つのグループの調整エネルギーが常に同じ値に漸近しようとしていることが分る。この結果は、しきい値入替法が、DQ ADLC の場合に有効に機能し、負荷機器グループが公平に負荷制御に貢献できることを示している。また、この平均合意アルゴリズムと回帰モデルを用いたしきい値入替法は、多数の需要側電力調整資源を電力システムの種々の安定化制御に活用する場合にも応用可能なアプローチになると考えている。

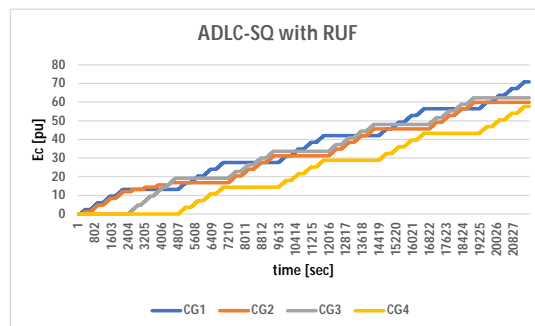
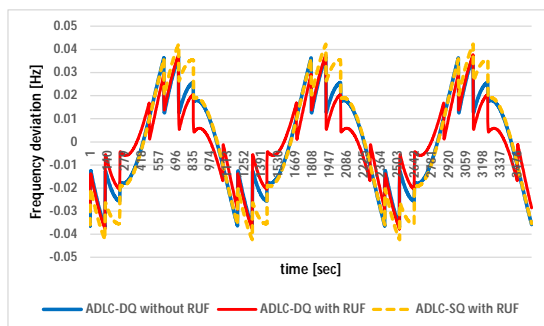


図8 周波数変動 (RUF: しきい値入替法) 図9 負荷機器グループの負荷調整エネルギー

< 引用文献 >

南裕樹, 東俊一, 杉江俊治, 離散値入力型フィードバック制御における最適動的量子化器, 計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 3, pp. 227-233, 2007.

H. Saitoh and J. Toyoda, "A Proposal of Average-Consensus-Based Load Control Reducing Unfairness in Use of Customer's Loads", Proc. of CIRED 2019, paper no. 1120, pp. 1-5, Madrid, Spain, June 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Akimi Sato, Hiroumi Saitoh
2. 発表標題 Application of Dynamic Quantizer to Load Control for Suppression of Power System Frequency Fluctuation
3. 学会等名 10th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Asia (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤明巳, 齋藤浩海
2. 発表標題 電力系統の周波数変動抑制のための自律分散型負荷制御が負荷母線電圧に与える影響
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堰合賢吾, 齋藤浩海
2. 発表標題 LFC支援デマンドレスポンスにおける通信遅延時間の確率の変動が周波数安定化に及ぼす影響
3. 学会等名 電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堰合賢吾, 齋藤浩海
2. 発表標題 離散型負荷制御における遅延時間が電力系統の周波数に与える影響
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤明巳、斎藤浩海
2. 発表標題 周波数変動抑制に有効なオンオフ負荷制御への最適動的量子化器の応用
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤明巳、斎藤浩海
2. 発表標題 周波数変動抑制を目的とした静的・動的量子化器を含む負荷制御系の性能と量子化幅の関係
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斎藤浩海、佐藤明巳
2. 発表標題 低圧需要家における調整力資源の潜在量の調査
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------