

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04355

研究課題名(和文)ハイブリッドモデル予測制御と機械学習による高速・安定な電力変換器制御の研究開発

研究課題名(英文) A study on fast and stable power conversion control with hybrid model predictive control and machine learning

研究代表者

丸田 英徳 (Maruta, Hidenori)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00363474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力変換器をハイブリッドシステムとしてモデル化し、モデル予測制御と機械学習による制御を組み合わせた新しい制御手法を開発することであった。複数の制約条件下での柔軟な制御を可能とするモデル予測制御の問題点である演算量について、組み合わせ的準最適化と動的量子化による実装による解決を検討した。また、高速応答をニューラルネットワーク制御により実現し、2つの手法を組み合わせることで、安定性・応答性を両立する制御手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力変換器の制御において、柔軟な制御手法であるモデル予測制御とニューラルネットワーク制御を組み合わせることで、安定性と応答性を両立することが可能な手法を開発した。また、提案手法では、制御における演算量を考慮し、制御器の性能に応じて演算コストと制御精度のトレードオフが可能であるため、比較的容易に提案手法を導入することが可能となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a novel control method using model predictive control and machine learning control for power converters which is treated and modeled as a hybrid system. Model predictive control can realize flexible functions under some constrained conditions, however, it requires heavy computation burden for its optimization problem. We addressed it by developing combinatorial enumeration-based computation and dynamic quantization to obtain pseudo optimal solution. In addition, we also adopted a neural network control to improve transient characteristics combined with model predictive control. The proposed method can obtain superior characteristics both in steady state and transient state simultaneously.

研究分野：電力変換器

キーワード：DC-DCコンバータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の EV・再生可能エネルギーの普及や IoT の広がりにより、それらの機器類に用いられる電力変換器の電力変換器には、安定性と応答性の相反する性能の改善が求められており、その制御手法や実装には新たな視点が必要となる。これらの要求に応えるには、従来のアナログ制御による実装では不十分であり、柔軟な制御手法の実現、センサー情報の取得・利用の容易さ、通信機能との親和性の高さなどの利点を多く持つデジタル制御の研究が進んでいる。

既存の電力変換器のデジタル制御において近年注目される MPC (Model Predictive Control) は、多変数パラメータに関する最適化が可能であり、観測・制御のパラメータが連続・離散・On-Off (論理値) の組み合わせとなるハイブリッドシステムの典型的な例である電力変換器に MPC を適用することで、これまでにない柔軟な制御を実現できる。一方で、MPC による電力変換器のモデル化と制御では、制御のための演算量が大きいたことが問題となる。また、変動や外乱に対する高速応答性の実現が難しく、保守的な安定条件が導出されることが多く、その結果、高速応答特性を実現できない。また、機械学習のひとつであるニューラルネットワークによりシステムのダイナミクスを学習し制御に用いることで、システムの非線形性に応じた制御による過渡特性の改善ができるが、定性的・定量的に安定性を保証することはできない。

よって、電力変換器の安定性・高速応答性を同時に実現するには、非線形制御による応答改善を行うとともに、非線形性に起因するシステムの不安定化を制約することのできる新しい手法が必要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、DC-DC コンバータをハイブリッドシステムとしてモデル化し、「MPC 制約によるシステムの安定化」と「機械学習を用いた非線形制御による高速応答性」とを同時に実現する新しい制御手法を開発することである。演算量と制御精度のトレードオフを考慮し、MPC における最適化演算量を削減する手法を開発する。また、ニューラルネットワークなどの機械学習を用いることで、システムの入出力関係や応答特性を学習し、予測による高速応答を可能とする非線形な制御に起因する過補償とシステムの不安定化については、過補償抑制の仕組みを導入することで解決を図る。

3. 研究の方法

(1) 組み合わせ的手法を用いた準最適化によるモデル予測制御

MPC を用いる場合、予測および最適化に必要な演算量が多くなり、リアルタイムでの演算が難しくなる。従来は、事前に制御入力を計算しておき、必要に応じて参照するオフライン型の最適化が行われてきたが、本研究では、組み合わせ的手法による準最適化を行い、リアルタイムでの制御入力の演算を行うことを検討した。

図 1 に本研究で提案した制御入力の算出方法の概念図を示す。MPC においては、現時点から数周期先 (図の場合 2 周期先) までの制御入力をモデルを用いた最適化により決定するが、その際、将来の制御入力の変動範囲を限定し、限られた候補についてのみ演算を行うことで準最適解を決定することとした。従来手法では、全候補から最適解を決定する必要があるが、限られた範囲での探索で済むため、演算量が削減される。一方、制御入力を大きく変動させる必要がある場合は、変動範囲から外れることもあるため、演算量と制御の精度はトレードオフの関係となる。

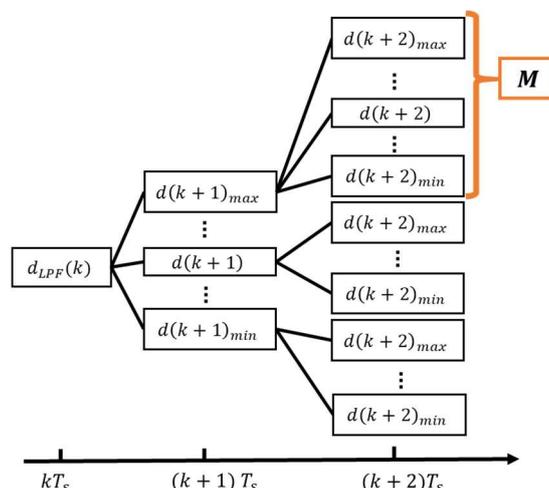


図 1: 制御入力の組み合わせ的準最適化による演算

電力変換器の特性上、大きな変動（外乱）でない場合は、制御入力も大きな変動は生じないため、安定した運用が可能となる。また、大きな変動に対応するためには、後述のニューラルネットワーク制御との組み合わせを検討する。

(2) 動的量子化による精度の向上と演算量の削減

組み合わせ的手法を用いた準最適化によるモデル予測制御において、制御入力の変動の制限は、DC-DC コンバータにおいて制御入力の PWM 分解能の低下をもたらす。この変動範囲は演算量に影響するため、変動範囲を大きく、すなわち、組み合わせ候補を多くし PWM 分解能を大きくすることは難しい。また、PWM 分解能が低下すると、制御対象の目標値への収束性に影響を与えるため、PWM の量子化誤差を動的に変動させることで、収束性を保証し、特に定常特性の改善を可能とする手法を提案した。

図 2 に提案手法の概念図を示す。PWM 分解能は、固定のままそのダイナミックレンジを DC コンバータの状態（定常時および過渡時）に応じて変動させることで、演算量を増加させることなく、収束性の改善をおこなう。この方法により、比較的小さな外乱などの影響に動的量子化で対応することで、定常時および過渡時の収束性の改善を行う。

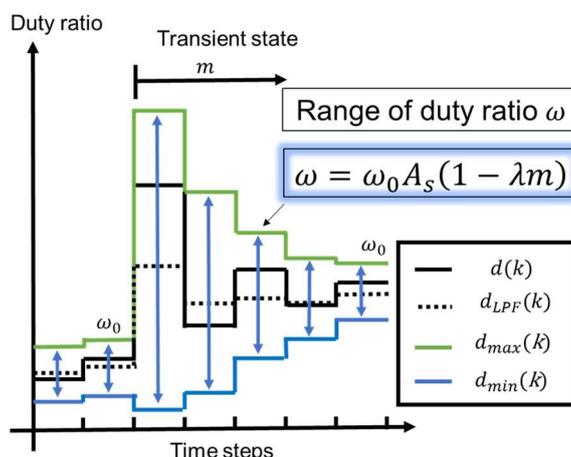


図 2：制御入力（PWM）の動的量子化

(3) ニューラルネットワーク制御による過渡特性の改善

上記の MPC による DC-DC コンバータ制御に加え、大きな変動（外乱）などに対する高速な応答を実現するために、従来より提案されているニューラルネットワーク制御を過渡時に切り替えて適用することで、高速応答を実現する。従来のニューラルネットワーク制御では、制御の非線形性により適用時に過補償が生じるため、過補償を抑制する仕組みが必要となる。本研究では DC-DC コンバータの特性に着目し、電流予測により過補償を抑制する方法を提案する。MPC とニューラルネットワーク制御は、DC-DC コンバータの状態により切り替えて用いられるため、それぞれの演算量が同時に必要となることはないため、運用時の演算量の負荷に余分な影響はほとんどないため、演算量評価は、それぞれの制御が必要とする演算量のどちらか大きいほうとなる。

4. 研究成果

提案手法を用いた DC-DC コンバータ制御について、降圧型コンバータをプロトタイプとして採用し、その特性波形を図 3~5 に示す。

提案する MPC による定常特性の改善について、図 3 に、(a) 低 PWM 分解能、(b) 高 PWM 分解能、(c) 動的量子化による低 PWM 分解能によるそれぞれの制御の定常波形（出力電圧、インダクタ電流、デューティ比）を示す。この結果より動的量子化により低 PWM 分解能のまま優れた定常特性を保つことができることが分かる [1]-[3]。

動的量子化による MPC の過渡特性について、図 4 に (a) 低 PWM 分解能、(b) 動的量子化による低 PWM 分解能にそれぞれによる過渡波形を示す。この結果より、動的量子化による過渡特性の改善が分かる。

過補償抑制を用いたニューラルネットワーク制御による過渡特性について、図 5 に (a) ニューラルネットワーク制御、(b) 過補償抑制を含むニューラルネットワーク制御それぞれによる過渡波形を示す。この結果より、過渡特性の改善について、過補償抑制が有効であることが分かる。

以上より、MPC とニューラルネットワーク制御を組み合わせることで、演算量と制御精度のトレードオフを考慮しつつ、定常特性および過渡特性を同時に改善可能な手法が実現されることが確認された。

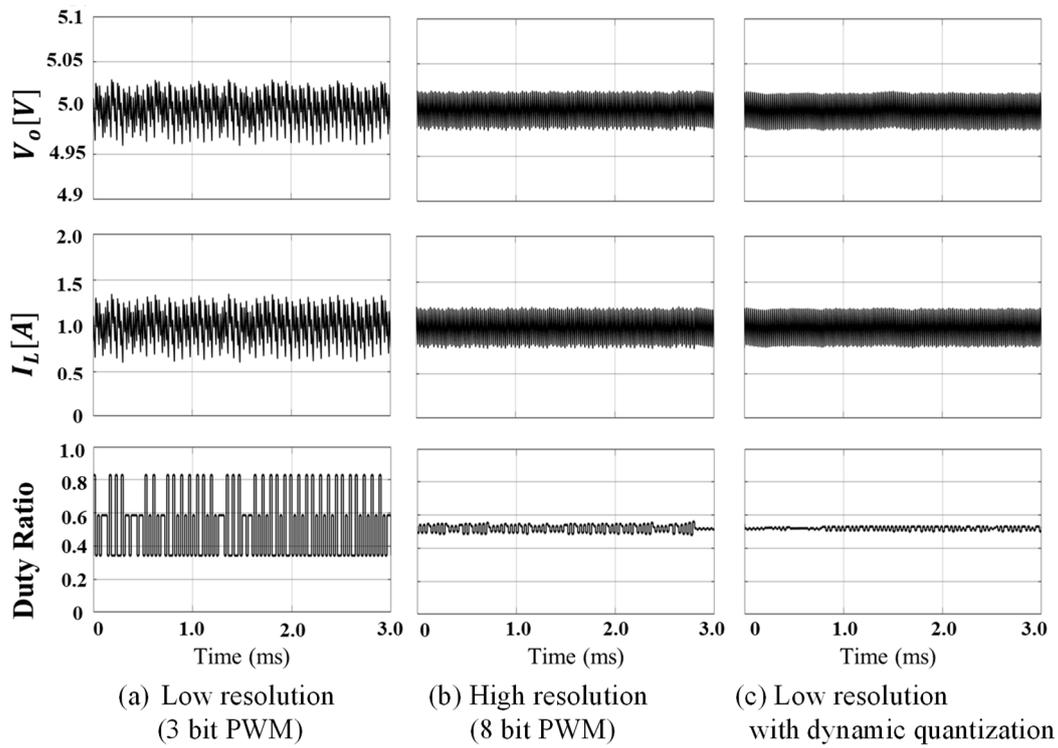


図 3 : 提案する MPC による定常特性

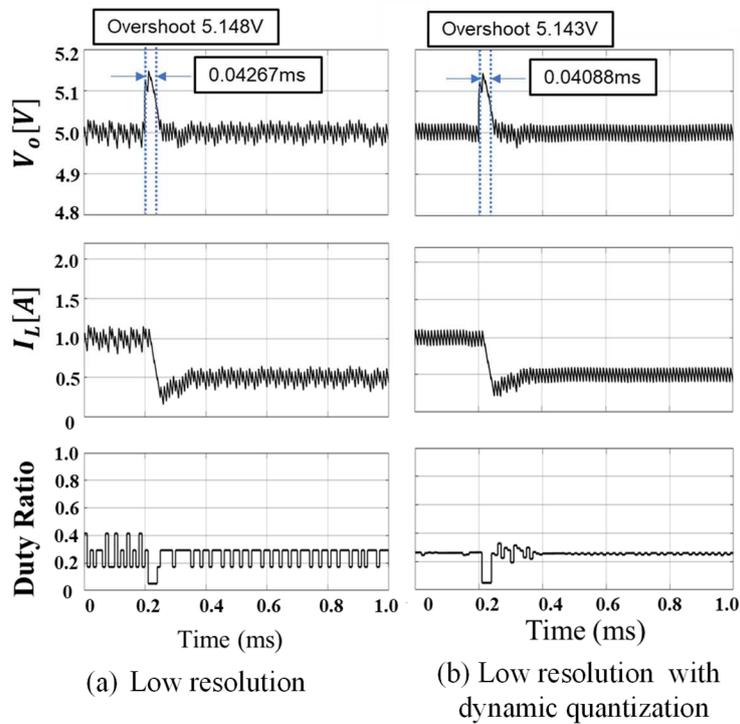
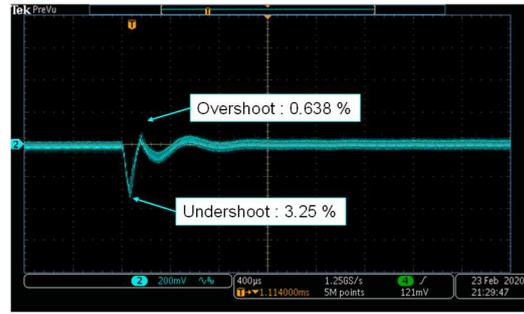


図 4 : 提案する MPC による過渡特性 (変動が小さい時)



(a) Neural network control



(b) Neural network control with overcompensation suppression

図 5 : ニューラルネットワーク制御による過渡特性の比較

関連文献 :

- [1]. Yuya and H. Maruta, "A Study on Model Based Control of DC-DC Converter with Simple Enumeration and Pruning Restriction Computation," IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019, pp. 1567-1572, doi: 10.1109/IECON.2019.8927141.
- [2]. N. Umeno and H. Maruta, "Stabilization Improvement of MPC based DC-DC Converter with Load Estimation," 2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2020, pp. 295-300, doi: 10.1109/ICRERA49962.2020.9242837.
- [3]. K. Taguchi and H. Maruta, "A Study on Effect of Dynamic Quantized Resolution on MPC Based DC-DC Converter with Combinatorial Optimization," 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2020, pp. 289-294, doi: 10.1109/ICRERA49962.2020.9242872.
- [4]. H. Maruta and D. Hoshino, "Transient Response Improvement of Repetitive-trained Neural Network Controlled DC-DC Converter with Overcompensation Suppression," IECON 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019, pp. 2088-2093, doi: 10.1109/IECON.2019.8927501.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Umeno Naoto, Maruta Hidenori
2. 発表標題 Stabilization Improvement of MPC based DC-DC Converter with Load Estimation
3. 学会等名 ICRERA2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taguchi Koya, Maruta Hidenori
2. 発表標題 A Study on Effect of Dynamic Quantized Resolution on MPC Based DC-DC Converter with Combinatorial Optimization
3. 学会等名 ICRERA2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口孝哉・野田侑也・丸田英徳
2. 発表標題 モデル予測制御と PI 制御を併用した DC-DC コンバータの過渡応答改善に関する検討
3. 学会等名 電気学会2019年産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田侑矢・田口孝哉・丸田英徳
2. 発表標題 組み合わせの最適化手法による DC-DC コンバータのモデル予測制御のスタートアップ特性評価
3. 学会等名 電気学会2019年産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野大樹・丸田英徳
2. 発表標題 ニューラルネットワークの切り替えを用いた基準値修正方式 DC-DC コンバータの過渡特性の検討
3. 学会等名 電気学会2019年産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田侑矢・丸田英徳
2. 発表標題 組み合わせ的最適化手法によるDC-DCコンバータのモデル予測制御の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子通信エネルギー技術EE)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野大樹・丸田英徳
2. 発表標題 推定電流を用いたニューラルネットワーク基準値修正方式DC-DCコンバータの過渡特性改善
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子通信エネルギー技術EE)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田侑矢・田口孝哉・丸田英徳
2. 発表標題 モデル予測制御の予測ホライズンステップ数の違いによるデジタル制御DC-DCコンバータの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告(電子通信エネルギー技術EE)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Noda, Maruta Hidenori
2. 発表標題 A Study on Model Based Control of DC-DC Converter with Simple Enumeration and Pruning Restriction Computation
3. 学会等名 IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maruta Hidenori, Hoshino Daiki
2. 発表標題 Transient Response Improvement of Repetitive-trained Neural Network Controlled DC-DC Converter with Overcompensation Suppression
3. 学会等名 IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------