

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06294

研究課題名（和文）マルチレベル電力変換器によるモーションコントロールシステムの高性能化

研究課題名（英文）Performance Improvement of Motion Control Systems by Using Multi-Level Power Converters

研究代表者

名取 賢二（Natori, Kenji）

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：70545607

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マルチレベル電力変換器の適用によるモーションコントロールシステムの高性能化について研究を行った。具体的には、マルチレベル電力変換器およびその変調方式の適用でもたらされる、高調波の抑制による電流制御および位置制御・力制御の改善、等価的なサンプリング周波数向上による制御性能および安定性の改善、デッドタイム電圧誤差の抑制による制御性能の改善について着目し、それぞれについて理論的な検討と実験による検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の意義は大きく以下の2点にまとめられる。1点目は、従来モーションコントロールシステムでは理想的に動作すると仮定することが一般的であった電力変換器の特性を陽に考慮して高性能化を試みた点であり、2点目は、大容量で高圧の用途に用いられることが多いマルチレベル電力変換器を小容量で低圧の用途に適用し、かつ制御性能の改善に着目して研究を行った点である。いずれについても関連分野において類似の観点からの研究は少ないため、特に学術的意義が大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research project studied performance improvement of motion control systems by using multi-level power converters. In particular, it focused on improvements of current, position, and force control performances due to reduction of harmonics, control performance and stability improvements by increase of equivalent sampling frequency, and control performance improvement provided by reduction of dead-time voltage errors. The harmonics reduction, increase of equivalent sampling frequency, and reduction of dead-time voltage errors are achieved by adoption of multi-level power converters and the modulation methods. The improvement effects have been theoretically and experimentally studied.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス モーションコントロール マルチレベル電力変換器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロボット工学やモーションコントロールなどの分野において制御システムを設計する際には、電動機、電力変換器および電流制御などの部分は理想的に動作するとみなす(定数として仮定する)ことが多く、その部分の特性の詳細を考慮して設計することはまれである(図1)。通常、機械システムとして求められる応答の時定数を考慮すれば、それに比べて非常に短い時定数で動作する電力変換関連部分があるように理想的に動作すると仮定しても問題がない場合が多い。しかし、特に高速・高精度なモーションコントロールシステム、例としてハプティクス(力覚情報伝達技術)や高精度位置決めなどにおいては、内部ループを構成する電力変換関連部分の動特性が機械システム全体の応答に影響を及ぼす可能性がある。したがって、そのような高速・高精度なモーションコントロールシステムにおいては、電力変換関連部分まで考慮し、その特性を陽に考慮した制御システムの設計が重要であると考えることができる。

一方、パワーエレクトロニクス分野においては、通常の2レベルの電圧値を出力する電力変換器に対して、多レベルの電圧値を出力することが可能なマルチレベル電力変換器の研究が注目を集めている。マルチレベル電力変換器は、2レベル電力変換器に比べて高調波を著しく抑制することが可能であり、駆動システムの銅損・鉄損の低減による高効率化や平滑フィルタの小型化に加えて、多レベル化によって各素子に求められる耐圧が低くなることでスイッチング損失が低減されることによる高効率化も期待されている(図2)。また同時に、このような特性から、マルチレベル電力変換器の導入による制御性能改善についても期待されている。

研究代表者のグループでは、上述のような電力変換関連部分の特性を陽に考慮したモーションコントロールシステムの高性能化に着目し、科研費の先行研究(基盤研究(C)2014年度2016年度“電力変換器の詳細なモデル化に基づく高性能モーションコントロールシステムの研究開発”)において、マルチレベル電力変換器の導入によるモーションコントロールシステムの高性能化の基礎的な検討を既に始めていた。一例として、通常の2レベル電力変換器を用いた場合とマルチレベル電力変換器を用いた場合の力制御応答および電流制御応答を示したのが図3である。電流制御応答・力制御応答の双方に違いが生じているのがわかり、特に力制御応答では振動抑制が確認できる。これらの結果は、制御パラメータをすべて同一とし、電力変換器のみ異なる場合に得られたものであり、電力変換器がモーションコントロールシステムの性能に影響を及ぼすこと、および、マルチレベル電力変換器によるモーションコントロールシステムの性能向上の可能性を示唆している。

このような背景から、マルチレベル電力変換器の特長を生かし、その特性を陽に考慮した制御システム設計により、モーションコントロールシステムの高性能化を実現するという本研究の着想を得た。

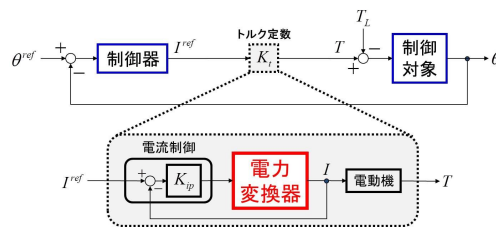


図1 電力変換関連部分の考え方

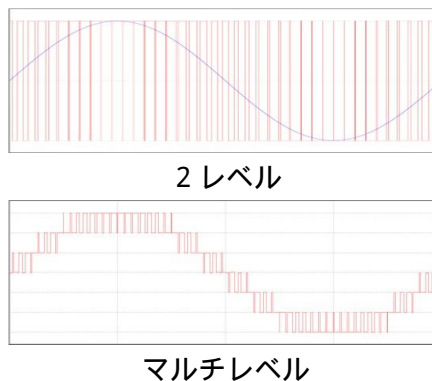


図2 電力変換器の出力波形

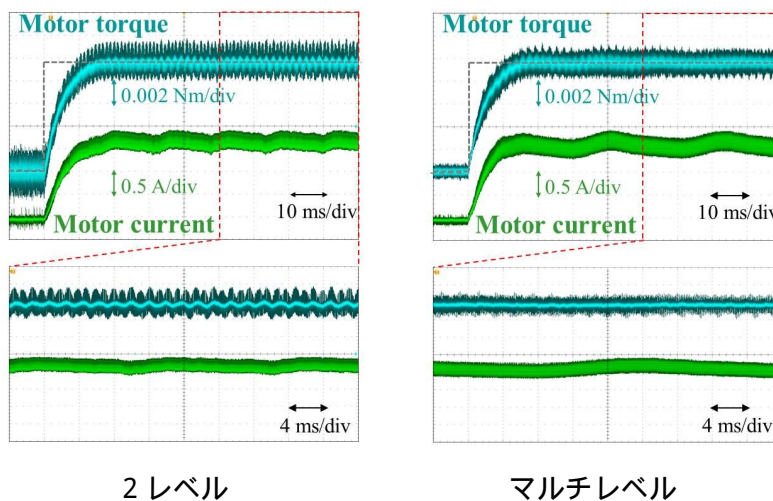


図3 力制御応答における電力変換器の影響

2. 研究の目的

本研究では、マルチレベル電力変換器およびその変調方式に関する特長のうちの2つの点に着目し、以下の2つの研究目的を掲げて研究を行った。

目的：高調波の抑制による『電流制御応答の改善および位置・力制御応答の改善』

目的：等価的なサンプリング周波数向上による『制御性能・安定性の向上』

目的については、マルチレベル電力変換器は通常の2レベル電力変換器に比べて高調波を著しく抑制することが知られているが、その高調波抑制による電流制御および位置制御・力制御への影響を明らかにし、制御性能改善を実現することを目的とする。目的については、マルチレベル電力変換器の変調方式により等価的なサンプリング周波数が向上することに着目し、それにより制御性能および安定性を向上させることを目的とする。以下、それぞれの研究目的の詳細について述べる。

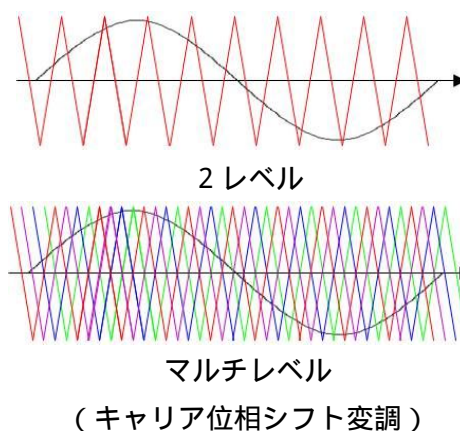


図4 電力変換器の変調方法

(1)高調波の抑制による『電流制御応答の改善および位置・力制御応答の改善』

研究代表者らのグループでは、マルチレベル電力変換器による高調波抑制とそれによっても考えられる制御性能改善に関して基礎的な実験検討を既に行っている。よって本研究では、レベル数などの各種パラメータにより高調波がどのように変化し、それにより電流制御応答および位置・力制御応答がどのように影響を受けるかについて、理論的な検討と実験による検証を行い、体系的に整理する。最終的には、検証により整理された関係に基づき、要求仕様に応じて、各パラメータをどのように設計・選択すればよいかの指針を得ることを目的とする。

(2)等価的なサンプリング周波数向上による『制御性能・安定性の向上』

マルチレベル電力変換器の変調方式の1つとして、キャリア位相シフト変調が知られているが、これは図4のようにレベル数が増える分キャリア波の位相をずらして変調する方式である。よって、図からもわかるように、ある一定の期間におけるキャリア波の個数が『(レベル数-1)倍』となるため、等価的にキャリア周波数(制御システムとして捉えるとサンプリング周波数)が『(レベル数-1)倍』とみなせるのではないかと考えられている。しかし、研究代表者らのグループではいくつかの実験的な検討により、等価的なサンプリング周波数は単に『(レベル数-1)倍』とはみなせないとの結果を得ていた。

そこで本研究では、実験により得られる諸特性に基づき、レベル数と等価的なサンプリング周波数がどのような関係を有するかを理論的・実験的に明らかにし、それをもとに制御性能・安定性の向上について検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、上述の目的 および目的 を達成するための研究を並行して進行した。また、それらに関連して、マルチレベル電力変換器の導入によりデッドタイム電圧誤差の抑制が可能であり、それによる制御性能改善についても期待できることから、デッドタイム電圧誤差抑制による制御性能改善効果についても研究を行った。以下に、それぞれの研究について研究方法の詳細を述べる。

(1)高調波の抑制による『電流制御応答の改善および位置・力制御応答の改善』

電流制御系および位置・力制御系において、レベル数などの各種パラメータを変更したときに高調波がどのように変化するかについて、またその変化が制御応答にどのように影響するかについてシミュレーションにより解析し、体系的に整理した。

(2)等価的なサンプリング周波数向上による『制御性能・安定性の向上』

レベル数により等価キャリア周波数がどのように変化するかについて理論的に整理した。また、等価キャリア周波数の向上による制御性能や安定性の向上について理論的な解析を行い、その結果について実験により検証した。

(3)デッドタイム電圧誤差の抑制による制御性能改善

マルチレベル電力変換器の回路方式と変調方式に着目し、2レベル電力変換器に比べてデッドタイム電圧誤差がどのように抑制されるか、それにより制御性能がどのように改善されるかについて数式と実験により検討した。マルチレベル電力変換器としてはフライングキャパシタ方式とダイオードクランプ方式を用いた。

4. 研究成果

ここでは、3. 研究の方法で述べた3つの点に関する研究成果について述べる。

(1) 高調波の抑制による『電流制御応答の改善および位置・力制御応答の改善』

主にシミュレーションにより、レベル数などの各種パラメータを変更したときの高調波の変化とそれによる電流制御系および位置・力制御系の制御応答への影響について検討した。各種パラメータを変更したことによる影響については確認することはできたが、結果として、パラメータごとの影響を体系的に整理するには至らず、それを基にした各パラメータの設計・選択指針を得ることはできなかった。この点については今後も継続的に検討を行う予定である。

(2) 等価的なサンプリング周波数向上による『制御性能・安定性の向上』

前述のように、キャリア位相シフト変調を用いた場合、等価的なキャリア周波数(制御システムとして捉えるとサンプリング周波数)は『(レベル数-1)倍』になるのではないかと考えられている。しかし一方で、研究代表者らのグループではいくつかの実験的な検討により、等価的なサンプリング周波数は単純に『(レベル数-1)倍』とはならないとの結果を得ていた。本研究では、対象とするシステムに関する制御性能と安定性の理論的な面について再度整理し、さらに実験システムにおける制御システムの実装などを見直した結果、等価的なサンプリング周波数が『(レベル数-1)倍』とみなせることを実験により確認した。

(3) デッドタイム電圧誤差の抑制による制御性能改善

マルチレベル電力変換器は2レベル電力変換器に比べ、各パワー半導体素子にかかる電圧が低くなるため、デッドタイム電圧誤差が抑制されることが考えられ、それによる制御性能の改善が期待される。そこで、デッドタイム電圧誤差について数式と実験により比較検討した。具体的には、2レベル電力変換器と、7レベルのフライングキャパシタ方式およびダイオードクランプ方式について比較した。図5がデッドタイム電圧誤差の比較結果(実験)である。ここでは、2レベルおよびダイオードクランプ方式についてはキャリア周波数24kHz、フライングキャパシタ方式についてはキャリア周波数4kHz(等価キャリア周波数は24kHz)とした。マルチレベル電力変換器の導入によりデッドタイム電圧誤差が減少していることが確認できる。また、それぞれの場合の電流波形を実験により比較したのが図6である(キャリア周波数の設定については図5と同様)。この結果から、マルチレベル電力変換器の導入によりデッドタイム電圧誤差が減少し、それにより波形が改善していることがわかる。

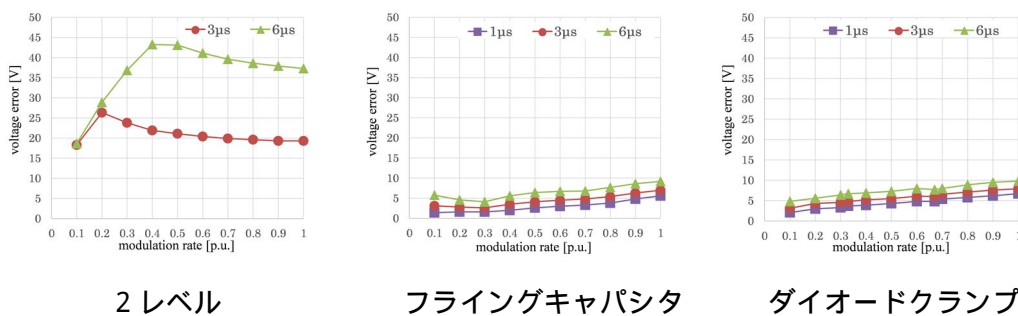


図5 デッドタイム電圧誤差の比較結果(実験)

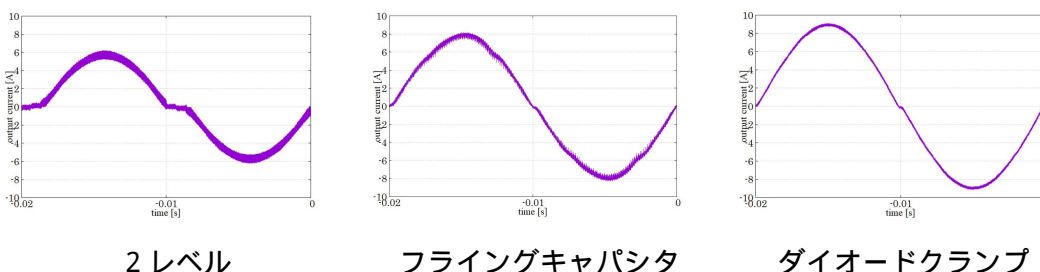


図6 電流波形におけるデッドタイム電圧誤差の影響(実験)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 千葉誠, 名取賢二, 佐藤之彦
2. 発表標題 マルチレベル変換器におけるデッドタイムに起因する電圧誤差の基礎的検討
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換 / モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉誠, 名取賢二, 佐藤之彦
2. 発表標題 マルチレベルインバータの回路方式と変調方式に着目したデッドタイムに起因する電圧誤差の検討
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換 / モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2020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