

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04439

研究課題名（和文）マルチレベル電力変換器のレベル数と変調方式に着目した制御性能改善に関する研究

研究課題名（英文）Study on Control Performance Improvement by Using Multilevel Power Converters Focusing on the Voltage Levels and the Modulation Methods

研究代表者

名取 賢二（Natori, Kenji）

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70545607

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）：本研究課題では、マルチレベル電力変換器の導入による制御性能改善に関する研究を行った。具体的には、マルチレベル電力変換器のレベル数と変調方式に着目して、それらに依存してデッドタイム誤差がどの程度抑制できるか、また、時間的・空間的分解能がどの程度向上するかについて検討した。さらに、当該検討結果に基づいて、レベル数と変調方式により制御性能改善効果がどのように変化するかについて検討し、一部については実験検証も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果には大きく2つの学術的意義があると考えられる。1点目は、高圧大容量用途で高圧化のために用いられることが多いマルチレベル電力変換器について、高圧化ではなく波形改善に着目し、それによる制御性能改善に関して検討を行った点である。2点目は、レベル数と変調方式というマルチレベル電力変換器の具体的なパラメータに着目し、それらがどのように制御性能改善に寄与するかを検討した点である。

研究成果の概要（英文）：This research project studied control performance improvement by introducing multilevel power converters. In particular, we investigated how the reduction of deadtime errors and improvement of temporal and spatial resolutions change depending on the voltage levels and the modulation methods of the multilevel power converters. Furthermore, we also studied how the voltage levels and the modulation methods affect the control performance improvement and experimentally evaluated some parts of the effects.

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 マルチレベル電力変換器 制御性能改善

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

電力変換器と電動機を用いる制御システムを扱う研究分野のうち、特にロボット工学などの分野では、位置制御や力制御の設計において、電力変換器や電流制御の特性を陽に考慮することはほとんどなく、それらは理想的に動作すると仮定して定数として扱うことが一般的である(図1)。これは、一般に電力変換器や電流制御の時定数が位置制御や力制御の時定数に比べて無視できるほど小さい場合がほとんどであるためである。しかし、特に近年では今まで求められなかったほどの高速・高精度な制御が求められる制御対象が出現しており、そのような制御対象では電力変換器や電流制御の特性を陽に考慮すべきであると考えられる。そこで研究代表者らのグループでは、電力変換器の特性に着目した制御システムの研究として、マルチレベル(ML)電力変換器に注目して研究を行ってきた。

ML電力変換器は、一般に高圧大容量用途において高圧化のために用いられることがほとんどであるが、多レベル化による波形改善が可能であることも大きなメリットである。これは、通常の2レベルの電圧値を出力する2レベル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であり、高調波を著しく低減することが可能であるためである(図2)。そこで研究代表者らのグループでは、このML電力変換器による波形改善により制御性能改善が期待できるのではないかとに着目し、科研費基盤(C)で2014年度~2016年度、2017年度~2019年度の2期にわたり研究を行った。その結果、ML電力変換器により、高調波抑制(波形改善)による制御性能の改善、等価的なサンプリング周波数の向上とそれによる離散系での安定性向上、デッドタイム誤差の抑制、などの効果が期待されることが明らかになった。また、それらの効果はレベル数と変調方式により異なることが示唆されていた。

そこで本研究では、上述の期待できる効果について整理・分類した上で、ML電力変換器のレベル数と変調方式に着目し、制御性能改善の観点からそれらの違いによる影響を明らかにすることを目的とした。

### 2. 研究の目的

本研究では次の3つの研究目的を掲げて研究を行った。

目的 : レベル数・変調方式に依存したデッドタイム誤差の抑制による制御性能改善

目的 : レベル数・変調方式に依存した時間的・空間的分解能の向上による制御性能改善

目的 : 目的で得られた知見に基づいた制御性能改善効果の最適化

以下、各目的の詳細について述べる。

(1) 目的 : レベル数・変調方式に依存したデッドタイム誤差の抑制による制御性能改善

以前の研究の結果、ML電力変換器の導入によりデッドタイム誤差の抑制などの効果が期待できることが明らかになっていた(図3)。そこで目的

では、レベル数と変調方式(回路方式)に着目してデッドタイム誤差の抑制効果について検討し、それによる制御性能改善効果を明らかにすることを目的とした。

(2) 目的 : レベル数・変調方式に依存した時間的・空間的分解能の向上による制御性能改善

以前の研究の結果、ML電力変換器の導入により等価的なサンプリング周波数の向上とそれによる離散系での安定性向上が明らかになっていたため、これを時間的・空間的分解能として整理し、その向上による制御性能改善効果について明らかにすることを目的とした。

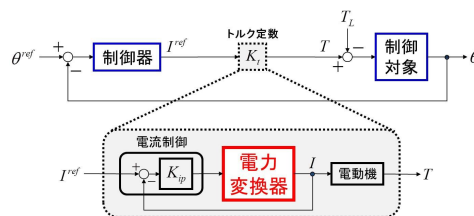
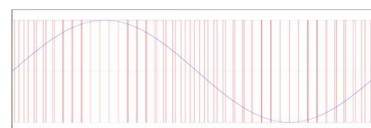
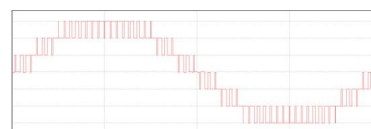


図1 電力変換部分の捉え方



2レベル



マルチレベル

図2 電力変換器の出力波形

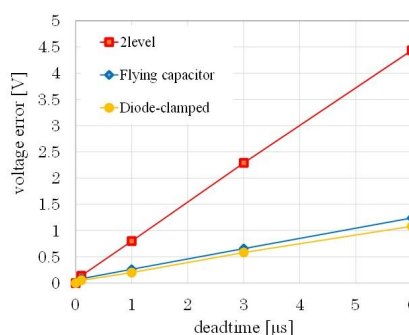


図3 デッドタイム誤差の抑制

(3) 目的 : 目的 で得られた知見に基づいた制御性能改善効果の最適化  
 ここでは、(1)(2)で得られた知見に基づき、所望の制御性能を実現するための最適なレベル数・変調方式の決定法と制御性能改善効果の最適化について明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

上述の研究目的ごとに研究の方法について述べる。

(1) 目的 : レベル数・変調方式に依存したデッドタイム誤差の抑制による制御性能改善  
 まずレベル数と変調方式を変更したときにデッドタイム誤差がどのような傾向で減少するかを定量的に明らかにした。次に、その減少量が制御性能をどれだけ改善するかについて定量的に検討し実験検証した。

(2) 目的 : レベル数・変調方式に依存した時間的・空間的分解能の向上による制御性能改善  
 まずレベル数と変調方式を変更した際に出力波形の時間的・空間的分解能がどれだけ向上するかを理論的に導出した。次に、それらの向上により制御性能がどれだけ改善するかについて理論的に検討し実験検証した。

(3) 目的 : 目的 で得られた知見に基づいた制御性能改善効果の最適化  
 目的 で得られた知見に基づき、所望の制御性能を達成するためにレベル数と変調方式をどのように選択すれば最適な組み合わせとなるかについて検討した。さらに制御ゲインの決定法とも組み合わせで制御性能改善効果の最適化について検討した。

### 4. 研究成果

上述の研究目的ごとに研究成果について述べる。

(1) 目的 : レベル数・変調方式に依存したデッドタイム誤差の抑制による制御性能改善  
 レベル数・変調方式(回路方式)に依存したデッドタイム誤差の抑制効果に関して、シミュレーションによる検討結果が図4である。レベル数が増えるにつれて抑制効果が大きいこと、変調方式(回路方式)による差異は(この条件においては)少ないことがわかった。また、これについてレベル数は限られるが実験検証も行い、デッドタイム誤差抑制効果が実験的にも明らかとなった。さらに、性能改善の例としてTHD(Total Harmonic Distortion)のシミュレーション結果を示したのが図5である。この結果から、デッドタイム誤差抑制効果による性能改善についても確認することができた。

(2) 目的 : レベル数・変調方式に依存した時間的・空間的分解能の向上による制御性能改善  
 時間的分解能の向上による制御性能改善効果については理論的な検討と実験による検証を行うことができ、制御性能改善効果が確認できた。一方で、空間的分解能向上による制御性能改善については結果として個別の検証をすることはできなかった。ただし、制御法を工夫することにより、時間的・空間的分解能の両方の面で制御性能を向上させることが可能であることを明らかにし、これについても実験により検証することができた。

(3) 目的 : 目的 で得られた知見に基づいた制御性能改善効果の最適化  
 結果として、具体的な指標に落とし込んでの総合的な最適化の検証はできなかったが、レベル数と変調方式の最適な組み合わせや制御ゲインの決定法による制御性能改善効果の最適化については、個別に検討および検証を行うことができた。

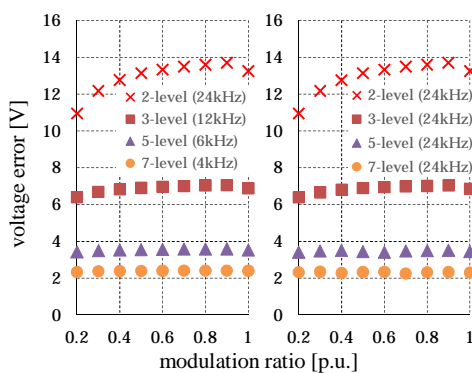


図4 レベル数・変調方式(回路方式)に依存したデッドタイム誤差の抑制

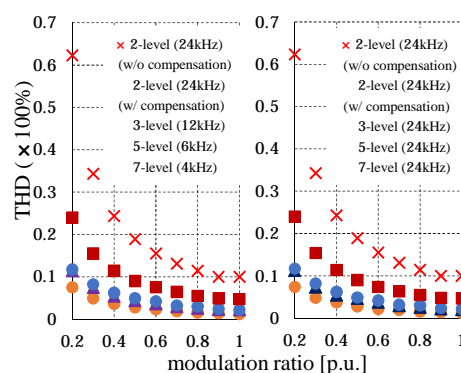


図5 レベル数・変調方式(回路方式)に依存したTHDの抑制

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 千葉 誠, 名取 賢二, 佐藤 之彦	4. 巻 142
2. 論文標題 単相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の影響の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 762-774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shota Kuroda, Kenji Natori, and Yukihiko Sato
2. 発表標題 PI Current Control Method for Realizing Deadbeat Characteristics
3. 学会等名 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shota Kuroda, Kenji Natori, and Yukihiko Sato
2. 発表標題 A Study on Performance and Stability of Current Control Systems by Using Multi-Level Inverters
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------