

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420222

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Research and Development of High-Performance Motion Control Systems based on Detailed Modeling of Power Converters

研究代表者

名取 賢二 (NATORI, Kenji)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70545607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究開発では、以下の2つの研究を行った。まず、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について、電流制御系、位置制御系、力制御系の実験検証を行い、電力変換器の特性が特に電流制御系および力制御系の性能に影響を及ぼすことを明らかにした。次に、マルチレベル電力変換器を用いた場合の等価的なキャリア周波数に着目して安定解析を行い、電力変換器とその変調方式がモーションコントロールシステムの安定性にどのような影響を及ぼすかについて検討した。

研究成果の概要(英文)：In this project, two researches described below have been conducted. First, experimental validation on current, position, and force control systems have been conducted comparing the cases using an ordinary 2-level power converter and a multi-level power converter. It has been confirmed that characteristics of power converters especially affects performance of current and force control systems. Second, effect of power converters and the modulation method on stability of motion control systems has been studied, focusing on the equivalent carrier frequency in the case of using multi-level power converters.

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

### 1. 研究開始当初の背景

モーションコントロールなどの研究分野では、制御対象の駆動部分である電力変換器や電動機などの動作は理想的なものと仮定することが多く、その部分は電流指令値と入力トルクの比を表す単純なトルク定数であると捉えることが一般的である(図1)。つまり、それら駆動部分、特に電力変換器の動作特性については考慮することなく、制御対象の動的・機械的特性を考慮して制御系設計をすることがほとんどである。しかしながら、例えば駆動部分に動特性が悪い安価な変換器を使用することなどを考えた場合、その部分の性能劣化は不可避であり、制御系全体の設計においてその部分を理想的に動作すると仮定することは適切ではない。また、上述の理由により制御系の要求仕様から適切な電力変換器や電動機を選定する指針も明確ではなく、予算の上限に応じて最も高性能な部品を選定しているのが現状であるといえることができる。つまり、電力変換器の詳細なモデル化および解析を行い、その動特性を明確にして陽に考慮することは、モーションコントロールシステムの革新的な性能向上につながる重要な視点であると考えられる。

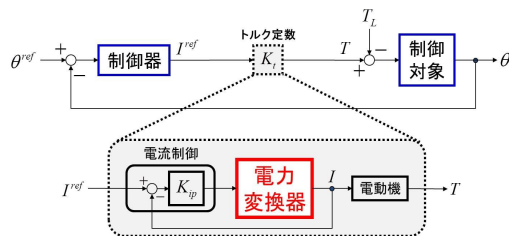


図1 制御システムにおける電力変換部分の捉え方

### 2. 研究の目的

上述の研究背景に基づき、次の3つを研究目的とした。

#### (1)「基礎研究」電力変換器の詳細なモデル化と解析手法の構築

本目的の代表的な関連研究として、インバータの離散時間モデル化手法が提案されている(K. P. Gokhale, et al.: "Dead Beat Microprocessor Control of PWM Inverter for Sinusoidal Output Waveform Synthesis", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 5, pp. 901-910, 1987)。本研究では、これらの従来研究を参考に、変換器動作を正確に再現するモデル化手法の提案のみならず、正確な解析を容易に行うことが可能な解析手法についても検討することを目的とする。

#### (2)「応用研究 I」電力変換器の特性を陽に考慮した制御系設計法の構築

本目的では、目的(1)で構築する電力変換器

の詳細なモデル化および解析手法に基づき、制御系設計を、電力変換器の特性を陽に考慮して行う手法を確立する。具体的には、電力変換器のモデルをモーションコントロールシステムのモデルに組み込んで制御系設計を行う手法を確立する。本目的を達成することで、モーションコントロールシステムにおいて制御側から変換器側を積極的に考慮した設計が可能となる。

#### (3)「応用研究 II」システム全体の性能向上を実現する電力変換器の開発

本目的では、目的(1)で構築する電力変換器のモデル化および解析手法に基づき、制御系の要求仕様を満たし、かつシステム全体の性能向上を可能にする電力変換器の開発について検討を行う。モーションコントロールの各制御系に特化した電力変換器の研究開発は数少ないが、最近ではモーションコントロールシステムの性能を電力変換器側から見直す動きがあり(Ohishi, et al.: "Fine Mechanical Impedance Control using Low-Noise Class-G Power Amplifiers", Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2013)、実際に性能向上が見込まれることが明らかになっている。

本研究では、マルチレベル電力変換器による性能向上について検討し、その結果に基づいてモーションコントロールの性能向上を実現するための電力変換器の開発について検討する。

### 3. 研究の方法

実際の研究開発においては、上述の3つの研究目的を大きく2つに統合し、それぞれ以下のような方法で研究開発を行った。

#### (1) 電力変換器の特性がモーションコントロールの制御系全体の性能に及ぼす影響についての実験的検証

ここでは、電流制御系、位置制御系、力制御系において、通常用いられる2レベルの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について、実験的に比較検討し、電力変換器の特性がモーションコントロールの制御系全体の性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。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著しく高調波を削減することが可能であることが知られているが、本研究開発ではその特性がモーションコントロールの各種制御系の性能に対してどのような影響を及ぼすかを検証した。これは、モーションコントロールの性能向上を実現するための電力変換器の開発にもつながる検討である。

具体的には、位置制御については図2のような制御系で、力制御については図3のような制御系で、それぞれ電力変換器部分のみ異なる(2レベルと9レベル)システムを実装し、それぞれの応答について実験的に比較検討

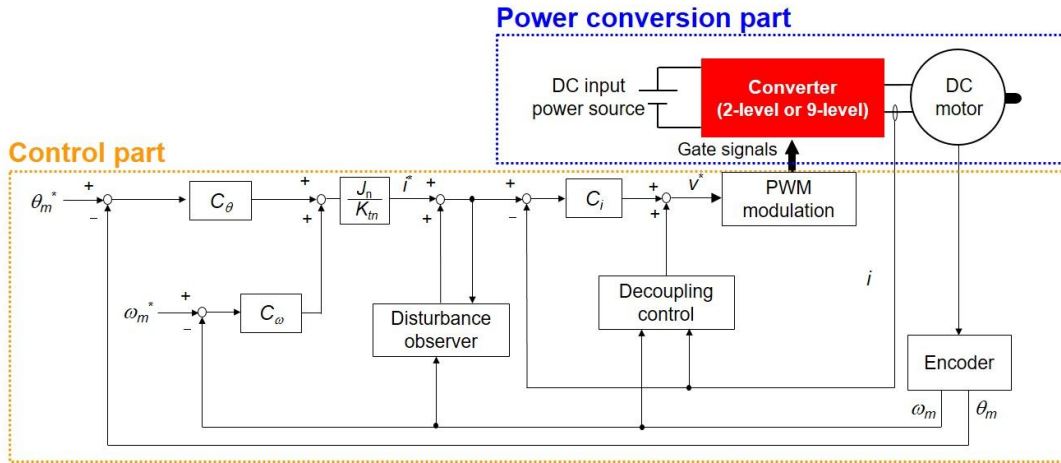


図2 実験検証に用いた位置制御系

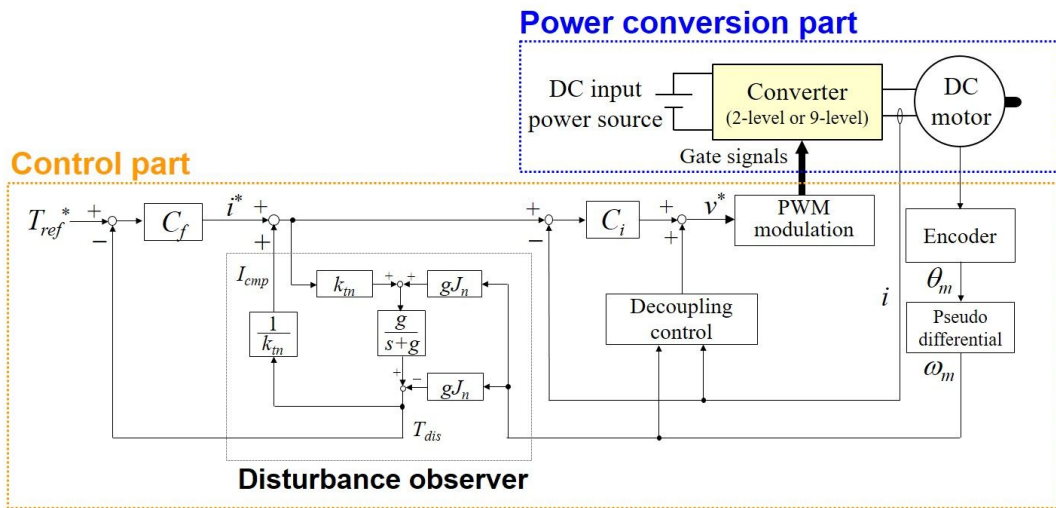
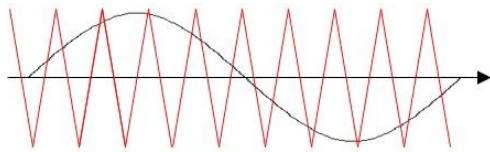
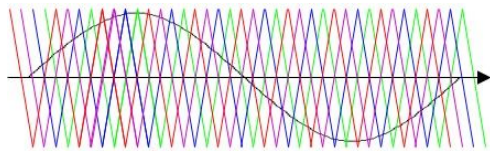


図3 実験検証に用いた力制御系



2レベル



マルチレベル (キャリア位相シフト変調)

図4 変調方式

した。なお、電流制御系の応答については位置制御系、力制御系それぞれにおいて比較検討した。

(2) 電力変換器の特性を陽に考慮した制御系設計法構築のための詳細なモデル化と解

### 析手法の提案

研究背景で述べたように、モーションコントロールシステムの制御系設計において、電力変換器の特性の詳細を考慮したものは数少ない。しかし、制御系のさらなる向上を目指すためにはその特性を陽に考慮した制御系設計法の構築は不可避であり、そのための詳細なモデル化および解析手法の提案は必須となる。よって、電力変換器部分の特性を陽に考慮するため、変換器の変調方式に着目した離散時間系でのモデル化および解析手法について検討した。マルチレベル電力変換器の変調方式の1つに、キャリア位相シフト変調方式(図4)があるが、この変調方式を用いた場合、例えばNレベルの電力変換器であれば、等価的なキャリア周波数はもとのキャリア周波数の(N-1)倍になるのではないかと考察がある。そこで本研究開発では、そのような考察に基づいて、等価的なキャリア周波数に応じた離散時間系モデルを構築して安定性について評価し、それを実験検証することによって、モデルの妥当性について検証することを目的とした。



#### 4. 研究成果

(1) 電力変換器の特性がモーションコントロールの制御系全体の性能に及ぼす影響についての実験的検証

位置制御系での実験検証

2レベル電力変換器を用いた場合の結果と9レベル電力変換器を用いた場合の結果をそれぞれ図5および図6に示す。

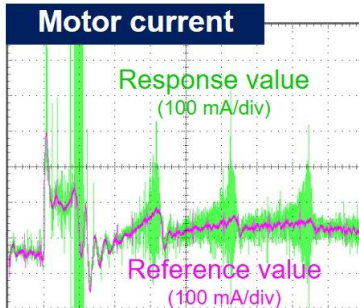
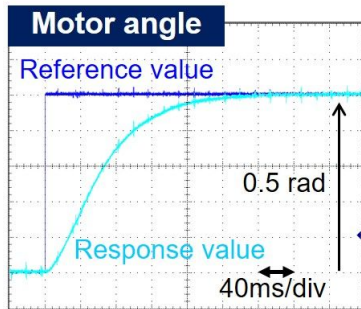


図5 位置応答(2レベル)

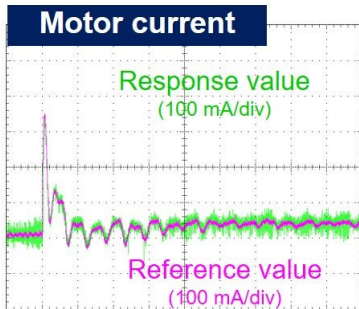
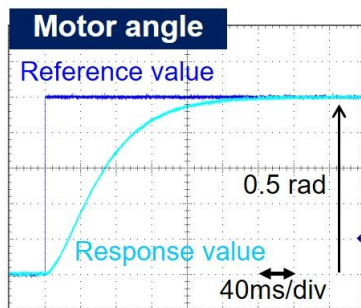


図6 位置応答(9レベル)

図5と図6を比較すると、9レベルの場合の位置応答のリプルが2レベルの場合に比べて減少していることがわかる。また、電流応答についてはリプルが大幅に削減出来ていることがわかる。

力制御系での実験検証

2レベル電力変換器を用いた場合の結果と9レベル電力変換器を用いた場合の結果をそれぞれ図7および図8に示す。

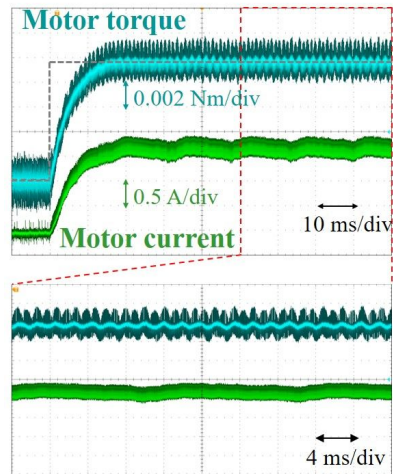


図7 力応答(2レベル)

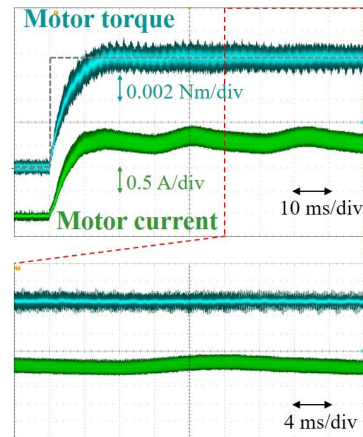


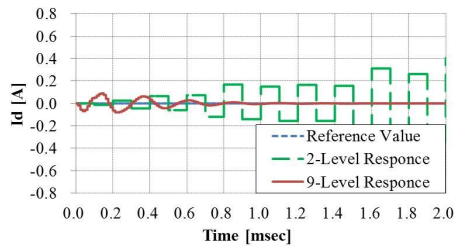
図8 力応答(9レベル)

図7と図8を比較すると、9レベルの場合の力応答のリプルが2レベルの場合に比べて著しく減少していることがわかる。これにより、位置応答の結果も含め、電力変換器の特性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が確認された。電力変換器のこのような影響を詳細に実験検証した例は少なく、本成果は今後の研究開発においても重要な結果であるということが出来る。

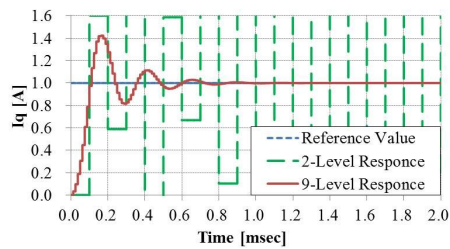
(2) 電力変換器の特性を陽に考慮した制御系設計法構築のための詳細なモデル化と解析手法の提案

まず、電流制御系について制御ゲイン等の条件を同一に設定し、その応答(安定性)が2レベルと9レベルで異なるかについて検証した。図9はある条件における電流制御の応答である。

図9より、制御ゲイン等の条件が同一である



d 軸電流



q 軸電流

図 9 電流制御応答

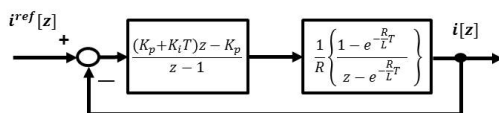


図 10 離散時間電流制御系

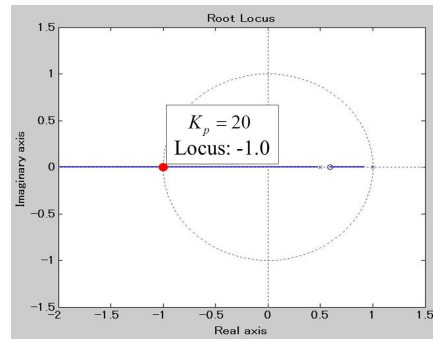
にも関わらず、2レベルの場合は不安定になっているのに対し、9レベルの場合は安定であることがわかる。これは、9レベルの場合は2レベルの場合に比べて等価的なキャリア周波数が  $(9 - 1) = 8$  倍であるとみなせるためであると考えられる。そこで、図10のような離散時間系の制御システムにおいて、それぞれの場合における安定限界を検証した。その結果が図11である。図11から、9レベルの場合には2レベルの場合に比べて理論的には制御ゲインを10倍まで上げられることを示している。ただし、この解析結果について実験検証したところ、実際には10倍まで制御ゲインを上げることはできなかった。この結果については、等価的なキャリア周波数の考え方の詳細を考慮してさらなる検証を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

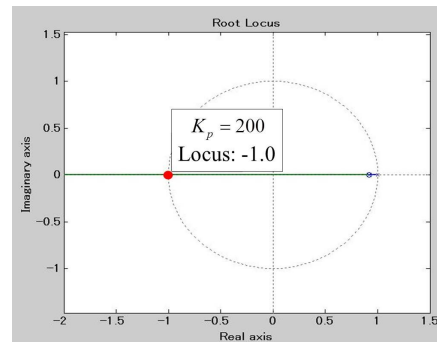
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

Naoto Chiba, Kenji Natori, and Yukihiko Sato, A Study on Performance Evaluation of Current Control Systems by Using Multi-Level Converters, Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC-Nagaoka 2016), JP23,



2 レベル



9 レベル

図 11 安定限界の解析結果

October 15th, 2016, Aore Nagaoka (Niigata, Nagaoka).

Hidemine Obara, Kenji Natori, and Yukihiko Sato, Experimental Study on Performance Improvement of Force Control by Using Multi-Level Converters, The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2015), pp. 5223-5228, November 12th, 2015, Pacifico Yokohama (Kanagawa, Yokohama).

Hidemine Obara, Tatsuhito Saito, Kenji Natori, and Yukihiko Sato, A Realization of High-Performance Motion Control Systems by Applying Multi-Level Converters, The 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2656-2662, October 30th, 2014, Dallas (USA).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

名取 賢二 (NATORI, Kenji)  
千葉大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70545607

### (2) 連携研究者

佐藤 之彦 (SATO, Yukihiko)  
千葉大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 50205978