

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05950

研究課題名(和文) 学習制御と繰返し制御によるPWM信号の直接生成法とその応用に関する研究

研究課題名(英文) A study of directly generating method of a PWM signal and its application using learning and repetitive control techniques

研究代表者

郭 海蛟 (GUO, HAI JIAO)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：00224353

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)：PWM信号は非線形信号となり、先進的な制御理論の適用がなかなかできない原因にもなる。しかし横軸を時間軸に、縦軸をPWMのオン信号の時間とすれば、デジタル制御系の制御信号となり、PWM信号の非線形性の問題が取り除かれる。まず、学習制御により単相インバータの駆動に適用した結果から著者の予想通りの駆動が実現でき、従来対応が複雑となるデッドタイム補償について学習の機能により簡単に改善できた。そして、繰返し制御をブラシレスDCモータの制御に適用し、従来の3相/2相座標変換を必要なく、直接3相独立制御を実現できた。これから各種制御理論の応用に更なる道を開けた。

研究成果の概要(英文)：PWM signal is a non-linear signal, so many advanced control theories not be simply applied. But, if we believe the horizontal axis as time and the vertical axis as the one signal of PWM, then that will be usually digital control signal and the non-linear problem will be removed easily. First, we use the learning control to the inverter and the results are as we expected. In addition, a difficult problem for compensating the dead-time also can be simply solved by learning control. Second, we use repetitive control technique to control the brushless DC motors. Because we overcome the nonlinear characteristics of the PWM signal, instead of the conventional coordinate transform method, a new directly independent phase control method was proposed and the results shown the proposed method working as well as the conventional vector control method. In addition, the abilities of the repetitive control techniques can easily solve more problems than using the conventional vector control.

研究分野：制御工学

キーワード：PWM 学習制御 繰返し制御 インバーター ブラシレスDCモータ 内部モデル原理

1. 研究開始当初の背景

環境温暖化を対処する有効な方法としては省エネルギー対策が非常に重要視されてきている。その中で電力変換機器としてのインバータは電気エネルギーを多く消費するモータの高効率利用では電気エネルギーを節約することに大きな役割を果たすことができる。高効率なモータ駆動システムにはモータの設計だけではなく、モータを高効率で制御する技術による貢献も重要である。モータの速度制御にはインバータが良く使われる。インバータの出力周波数を変化することにより、モータの回転速度を制御することができる。インバータの出力周波数を制御するためには、インバータを構成するスイッチング素子のオン/オフの制御が重要である。その制御には、三角キャリア波と正弦波比較方式による PWM 制御方式と空間ベクトルによる方法がよく使われている。三角キャリア波と正弦波比較方式では直接オン/オフのパルス信号を出すよりは必要な指令信号としての正弦波を求めて、三角キャリア波との比較により PWM 信号を生成するので、いわゆる、間接的にオン/オフのパルス信号を生成する方法と言える。そのための回路装置を用意する必要もある。一方、空間ベクトルによる方法はそれなりの計算量が必要となる。効率よく PWM 信号を発生する研究は制御の分野でも話題となり、各種最新の制御理論（動的計画による近似最適制御方法、モデル予測制御による方法、サンプル値 H_{∞} 制御による方法）による試みも見られたが、複雑が故実用が困難で、有効な方法としてはいまだに見つからないのが現状である。

多くのモータが常に可変速に運転するよりは、それぞれの定常速度での使用が多いことを考えると、定常回転が周期的な運動なので、制御信号としてのオン/オフのパルス信号も周期的になる。このような特性をに着目して、ロボットの分野で盛んに使われている学習制御と繰返し制御という方法がこのような周期的制御信号の生成にも有効と考えられる。いままでは学習制御と繰返し制御によるモータの速度制御などへの応用も少しながら見られるが、ほとんどモータの速度制御に必要な正弦波指令値信号を求めて、それから三角キャリア波と比較して、オン/オフのパルス信号を出す方式を採用している。いわゆる、間接的にオン/オフのパルス信号を出す方法である。直接的にオン/オフのパルス信号を出す試みもあったが、計算はかなり複雑で、実用に結び付くにはまだ程遠い。

これに対して著者は学習制御と繰返し制御について、在外研究を利用してコロンビア大学の先生達と議論を重ねてきて、学習制御と繰返し制御により、直接オン/オフのパルス信号を出す方法について検討してきた。その中では、いままで、直接的に応用しなかった理由としては、インバータの PWM 信号は非線形的な波形として捉えられ、そのため応用

はそう簡単ではないと考えられている。著者がこの問題は離散時間制御系として取り扱いやすく、離散時間の学習制御と繰返し制御を利用することが有効と考えられ、検討を重ね次のように見方を変える事で、十分応用することが可能だと気づいた。PWM 信号として、横軸を時間軸に、縦軸を電圧（あるいはオン信号としての 1 で表すことが一般的である。この観点から見れば確かに非線形的な信号のように見られる。しかし、横軸を時間軸に、縦軸をオン信号の時間とすれば、離散時間制御系の制御信号としてよく使われるものとなる。オフ信号の波形はサンプリング周期からオン時間をマイナスすれば簡単に得られる。このような制御信号の生成は学習制御と繰返し制御を利用することのメリットとしては広く知られている。このように応用できれば、DSP などから直接デジタル信号を出してインバータのゲート信号に利用できるので、ハードウェアの面から見れば従来の三角キャリア波と正弦波を比較するなどによる PWM 制御信号の生成方法より非常にシンプルとなる。ソフトウェアの面から見れば、学習制御・繰返し制御の方法は割りと簡単に計算のリソースがそれほどかからないメリットもある。更に、学習制御・繰返し制御の特長を利用して、モータを制御するために、省エネルギー、経年変化、モータの磁石の配置の非対称性、着磁の非均一化などによる非線形的な影響、外乱に強い、重力などによる回転ムラをなくす方法を学習と繰返しによりその制御方法と制御信号を見つけ出す可能性に大いに期待できる。

2. 研究の目的

このように学習制御と繰返し制御方法を用いて、直接 PWM 制御信号を作り出す試みは著者の独自の発想によるもので国内・外の研究を見ても殆ど見られていない。以上のような考えを基に、本研究は、学習制御と繰返し制御により直接 PWM 制御信号を生成するインバータ制御システムの開発とモータの速度制御システムへの応用を目的とする。

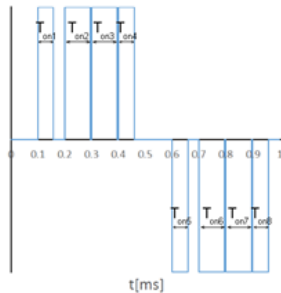
3. 研究の方法

まず、理論上から学習制御と繰返し制御を用いてインバータのスイッチング制御信号（PWM 信号）を直接生成することの可能性を明らかにする。そしてシミュレーションモデルを作成し、学習制御・繰返し制御を用いて、実際にインバータにより周波数が変換できることを確認する。そして、3 相インバータを用いて、ブラシレス DC モータ (BLDCM) の速度制御システムのシミュレーションモデルを構築し、BLDCM の速度を十分に制御できることを明らかにする。更に、従来の PWM 制御に考慮することが困難な課題に拡張していく。例えば、デットタイムの設定はインバータの制御には必要で、その影響を考慮する PWM 信号の生成法、外乱に強い PWM 信号の生成法、基本周波数成分がより多く含む PWM 信号の生成法（より滑らかな回転、省エネルギー

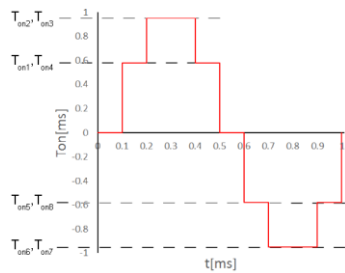
一運転に繋ぐ可能性が高い)、BLDCM 着磁の高調波成分を低減するような PWM 信号の生成法などの開発を行う

4. 研究成果

(1) PWM信号に対する新しい見方を見出した。パワーエレクトロニクス分野にはPWM信号を各種スイッチングデバイスの駆動信号として欠かせないものとなっている。一方、このような信号は非線形と見なされ、スイッチングデバイスを含むシステムの制御系の設計に困難をもたらす。優れた制御理論の応用の妨げとなり、長い間この問題を克服できなかった。多くの対応方法を試みたが複雑の割に効果がそれほど期待できるものはない。著者も長い間に悩んできたが、デジタル制御に長く研究してきた経験から、PWM信号を従来のデジタル制御信号に見直すことができることを見出した(図1)。この見方により、制御器の出力は図1(b)のような従来のデジタル制御信号を出力すればよいことがわかり、各種制御理論の応用に道を開くことになる。



(a) 従来のPWM信号

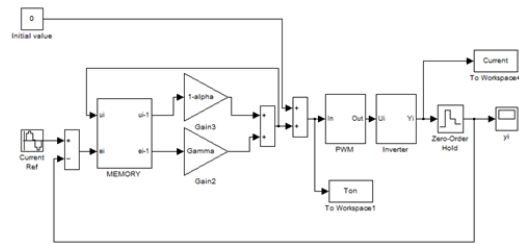


(b) PWM信号のデジタル的見方

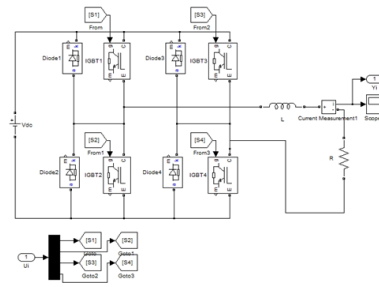
図1 PWM信号の新しい見方

(2) 学習制御によるインバータの制御を成功し、更にデットタイムの補償にも有効であることを確認した。上記の(1)の成果により、各種制御理論の応用に道を開いたので、パワーエレクトロニクス分野には周期的に動作を行うことが多いことを考えて、制御理論における周期的な動作に非常に有効な学習制御を使うことでいろいろな効果が期待できると思った。その結果として、図2に期待通りの波形を得られたことを示した。また、図3に追加学習によりデットタイムによる波形の歪みを補償できることも明らかになった。これはこのような高度な制御理論を適用することによる効果が大きいであることを示した。従来のデットタイムを補償する方法に

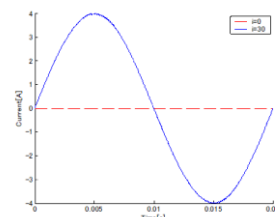
比べ、より簡単となり、より効果的になったことがわかった。これらの成果を国際会議にて発表した。



(a) インバータ制御系



(b) インバータ



(c) 目標値に追従した出力波形

図2 学習制御によるインバータの制御

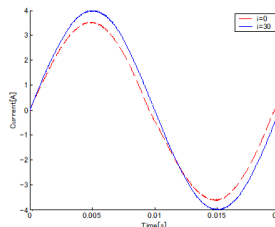


図3 デットタイムの影響の補償

(3) 繰返し制御によるBLDCMの速度制御に適用し、ベクトル制御とほぼ同様な結果を得られ、更に繰返し制御の特徴を生かして、モータにおける高調波の低減を容易にできることを明らかにした。モータの制御技術としてベクトル制御+PI制御がよく知られている。ベクトル制御を実現する方法として座標変換もよく知られている。この座標変換について全体の制御系の設計に高度な制御理論の適用に支障をきたす。そのため、PI制御器以外の制御方法があまり見られていないのが現状である。これに対して、著者は長年のデジタルサーボ系に関する研究の経験から内部モデル原理がBLDCMの電流制御に十分適用できる確信を持っている。それを適用すれば、座標変換が必要としない3相独立制御が可能となる。電流波形が周期

的に繰返し正弦波を考えれば、繰返し制御という制御理論を適用するのが非常に有効であることが考えられる。ベクトル制御によるBLDCMの速度制御系の構成は図4(a)、提案する内部モデル原理による同構成は図4(b)に示した。図からわかるように提案方法は座標変換が必要としない、また、3相を独立に制御できることがわかる。図5には二つの方法のシミュレーションの結果を示している。過渡状態では僅かな違いを除けばほぼ同じであることがわかった。図6には二つの方法の電流波形を示し、図7と図8にはそれぞれの電流波形で、ほぼ同じであることが確認できた。これにより、提案方法はより簡単、3相独立制御が可能などのメリットがあることを明らかにした。

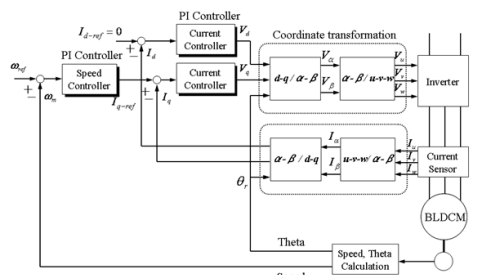


図4(a) ベクトル制御による制御系

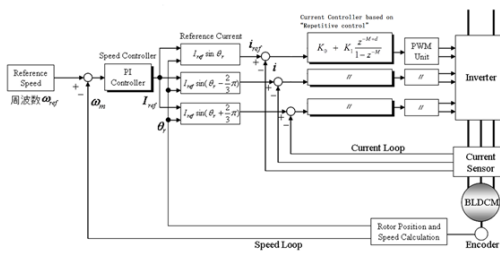


図4(b) 提案する制御による制御系

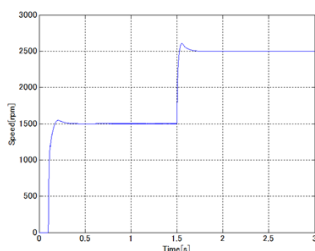


図5(a) ベクトル制御系の応答

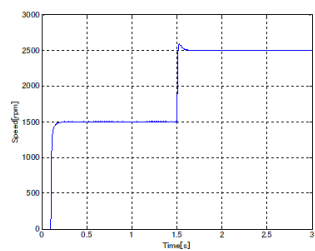


図5(b) 提案する制御系の応答

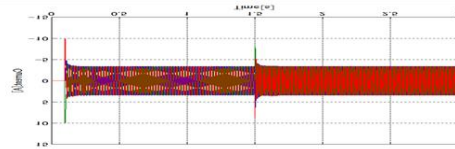


図6(a) ベクトル制御時の電流波形

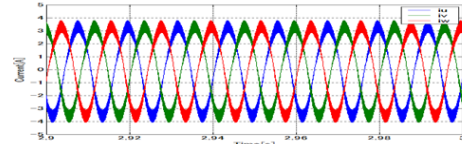


図6(b) 上記の拡大図

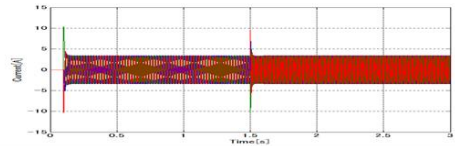


図7(a) 提案方法制御時の電流波形

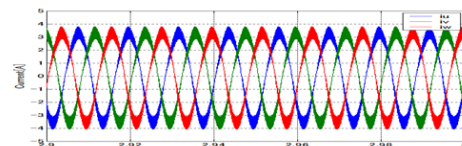


図7(b) 上記の拡大図

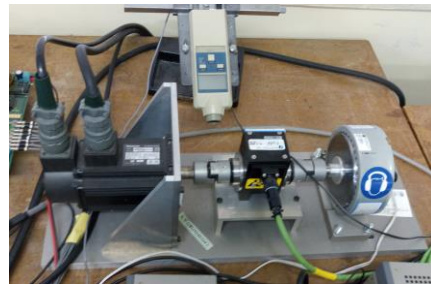


図8(a) 実験用モータ

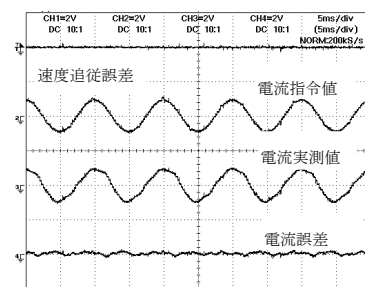


図8(b) 実験結果

また、実験による確認は図8に示している。図8(a)には実験に使われたモータ、図8(b)には提案方法による応答を示した。シミュレーションとほぼ同じな結果が得られた。これらの結果を纏めたものを既に国際会議に投稿した。

(4)また、研究の過程を通じて新たに考案した高次繰返し制御系の設計法を提案した。繰返し制御によるBLDCMの速度制御がとても有効であることを確認されたので、繰返

し制御系の能力を活用していくことが望まれる。従来の繰返し制御は目標値と同じ周波数の外乱について抑制できるがそれ以外の外乱について抑制できない。モータの制御系には指令値と異なる周波数の外乱もあるので、抑制することも必要である。著者は高次繰返し制御系の特徴を利用して、任意の周波数の外乱を抑制できる設計法を提案した。例えば3次繰返し制御系について、目標周波数を10 Hzとして、外乱周波数を11 Hzの場合について設計する時、感度関数について図9(a)に、時間応答について図9(b)に示した。感度関数から目標周波数10Hz以外に11Hzでも零となり、時間応答から11Hzの外乱が抑制され、10Hzの目標に追従されていることがわかる。これらの結果は既に国際会議にて発表した。今後これらの結果の応用が楽しみである。

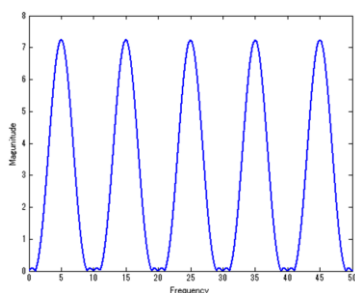


図9(a) 感度関数

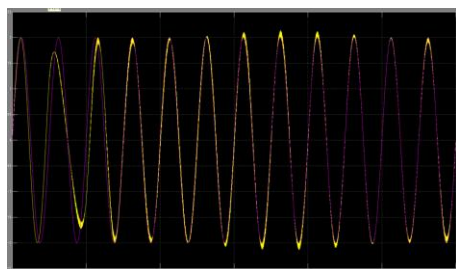


図9(b) 時間応答

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 4件)

- ① Hai-Jiao Guo, Tamotsu Kobayashi and Tadashi Iahihara, Alternating Current Waveform Control Method for BLDCMs Using Repetitive Control Techniques, AEIT international 2018 annual conference, 2018
- ② Tadashi Iahihara and Hai-Jiao Guo, Multivariable Optimal Disturbance Cancellation for Sinusoidal Output Disturbance, SICE2018, 2018
- ③ Hai-Jiao Guo and Tadashi Iahihara, Some Fundamental Aspects of Second and Third Order Repetitive Controllers, ASCC2017, 2017
- ④ Hai-Jiao Guo and Tadashi Iahihara, A

STUDY OF DIRECTLY GENERATING PWM SIGNAL USING LEARNING CONTROL METHOD AND APPLICATION TO INVERTER DRIVE, CEEE2016, 2016

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 郭 海蛟 (GUO, HAI JIAO)
東北学院大学・工学部・教授
研究者番号：00224353