

### マルチコイルモータの高精度化，高信頼化， 高効率化のための駆動手法

石川，愛章 / ISHIKAWA, Yoshiaki

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要．理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030686>

# マルチコイルモータの高精度化, 高信頼化, 高効率化のための駆動手法

METHODS FOR HIGHER PRECISION, RELIABILITY, AND EFFICIENCY OF MULTI-COILS MOTOR

石川愛章

Yoshiaki ISHIKAWA

指導教員 安田彰

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

This paper proposes a method for generating output coil combinations for high-precision drive of multi-coils motor (MCM) and verifies the effectiveness of the method through experiments. A method to reduce current distortion caused by deadtime is also proposed, and its effectiveness is verified through simulation. For higher reliability, we also propose a method to compensate the output power even if some of the motor coils are limited and verify the output power under load from experiments. We also propose a method to reduce the noise component of the current flowing for the motor for higher efficiency and verify the effectiveness of the method through simulation.

**Key Words** : Multi-coils motor, Digitally direct driven technology, Delta sigma modulator, Noise-shaping dynamic element matching

## 1. はじめに

モータは運動エネルギーを機械エネルギーへ変換するデバイスとして広く用いられてきた。特に、小型化, 高出力化と高効率化を達成可能な永久磁石同期モータ (PMSM) は家電をはじめ電気自動車などにも広く用いられている。このPMSMを利用してデジタル直接駆動技術が適用可能なモータとしてマルチコイルモータ (MCM) が提案されている[1]。本研究ではこのMCMの高精度化や高信頼化, 高効率化を達成するための手法について提案する。

## 2. デジタル直接駆動技術

### (1) $\Delta\Sigma$ 変調器

モータをインバータ回路で駆動できるようにするために, デジタル直接駆動技術では,  $\Delta\Sigma$ 変調器を用いることで, デジタル信号に変換する。1次の $\Delta\Sigma$ 変調器の構成を次の図1に示す。

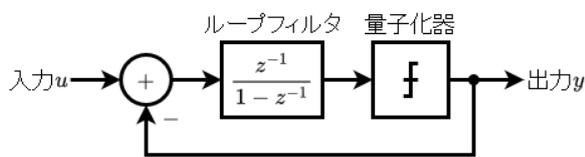


図1  $\Delta\Sigma$ 変調器の構成図

$\Delta\Sigma$ 変調器は, まず入力信号のオーバーサンプリングを行うことで, 信号帯域内の量子化雑音を低減させる。次にサンプリングした信号をループフィルタと量子化器を用いて処理することで, ノイズシェーピング特性を有したデジタル信号が得られる。

### (2) Noise-shaping Dynamic Element Matching

$\Delta\Sigma$ 変調器で得られたデジタル信号をDAC等のデバイスで出力する際, 各素子にミスマッチが存在すると, 出力にミスマッチ雑音が生じる。これを低減するには素子の精度を向上させる必要があるが, コストが問題となる。そこで, デジタル直接駆動技術では, ミスマッチシェーパーの一つであるNoise-shaping dynamic element matching (NSDEM)を用いる。NSDEMの構成を次の図2に示す。

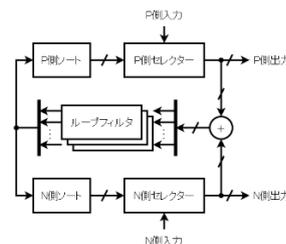


図2 Noise-shaping dynamic element matchingの構成図

NSDEMは、 $\Delta\Sigma$ 変調器のデジタル値に応じて駆動する素子を選択する。この時、ループフィルタの積分器を用いて、過去の使用頻度に基づいて選択することで、ミスマッチシェーピング特性を持った出力が得られる。

### (3) マルチコイルモータ

デジタル直接駆動技術では、 $\Delta\Sigma$ 変調器とNDEMで生成されたマルチレベルのデジタル信号を駆動する必要がある。そこで、PMSMのコイルを出力素子として、分割し独立して駆動させることで、マルチレベル出力を実現するマルチコイルモータ(MCM)が提案されている[1]。MCMの構成を次の図3に示す。

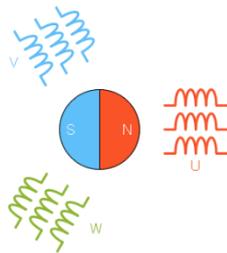


図3 マルチコイルモータの構成図

図3は、3相3コイルのMCMの構成を示している。これは、3相として3つのコイルまたは、直列接続されたコイル群を持つPMSMに対し、1相あたり3つのコイルに分割することで得られる。本稿では、3相3コイルのMCMについて論ずる。

### (4) デジタル直接駆動システム

マルチコイルモータを駆動するためのデジタル直接駆動システムを次の図4に示す。

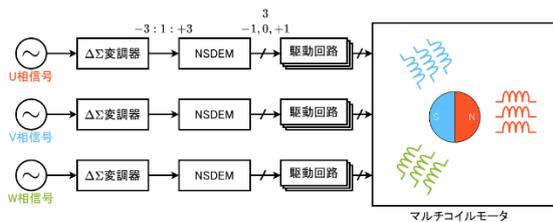


図4 デジタル直接駆動システムの構成図

デジタル直接駆動システムは、 $\Delta\Sigma$ 変調器、NSDEMおよび駆動回路とMCMで構成される。駆動回路には一般的にHブリッジ回路が用いられる。Hブリッジ回路はコイルの両端に正電圧、逆電圧、短絡の3値の電圧を印加することが可能である。

3相3コイルのMCMを駆動するには、入力に3相交流などの3相信号が用いられる。それらの信号から $\Delta\Sigma$ 変調器によって-3から+3の7レベルの量子化値が得られる。この量子化値からNSDEMを用いることで3コイルそれぞれに加える-1, 0, +1の3値信号が得られる。この信号に基づき駆動回路を用いることで実際にコイルに電圧が印

加され、磁界が発生する。この磁界によって回転子に対してトルクを生み出すことでMCMは駆動する。

## 3. 高精度駆動システム

### (1) Honeycomb-structured Space Vector Delta Sigma Modulation

デジタル直接駆動技術は従来スピーカを駆動するためのシステムとして考案されている。そこで、デジタル直接駆動技術をモータのために最適化し、高精度駆動を可能としたシステムが提案されている[2]。

MCMを駆動する際に3相信号ではなく、磁界ベクトルを直接量子化するためのシステムとしてHoneycomb-structured space vector delta sigma modulation (HSVD SM)が提案されている。HSVD SMの構成を次の図5に示す。

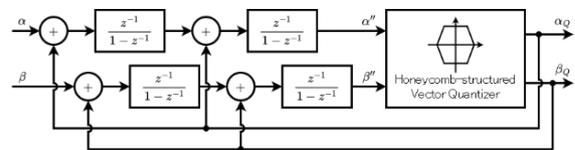


図5 Honeycomb-structured space vector delta sigma modulationの構成図

HSVD SMは、3相信号を2軸に変換した $\alpha\beta$ 信号が入力され、任意の次数のループフィルタ(図5は2次のループフィルタを用いている。)で処理される。処理された信号はハニカム構造型ベクトル量子化器で量子化され、離散化された量子化ベクトルは、後段へ出力されると同時にループフィルタへフィードバックされる。

ハニカム構造型ベクトル量子化器の量子化平面を次の図6に示す。

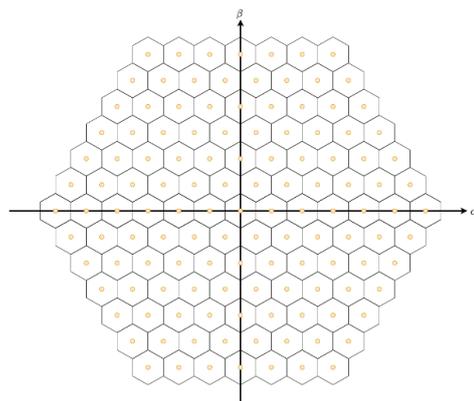


図6 ハニカム構造型ベクトル量子化器の量子化平面

3相3コイルのMCMには計9つのコイルが存在し、全部で127通りの磁界ベクトルを合成可能である。ハニカム構造ベクトル量子化器は、これらの合成磁界ベクトルを量子化ベクトルとして保持し、入力ベクトルに対して最も近傍にある量子化ベクトルを出力する。

## (2) Full-search Dynamic Three-Phase Multi-Coil-Motor Matching

HSVDSM が出力する量子化ベクトルに対して、そのままでは NSDEM を適用することができない。そこで、全てのコイルを対象にシャッフリング手法を適用する Full-search dynamic three-phase multi-coil-motor matching (FDTMM) が提案されている[2]。FDTMM の構成を次の図 7 に示す。

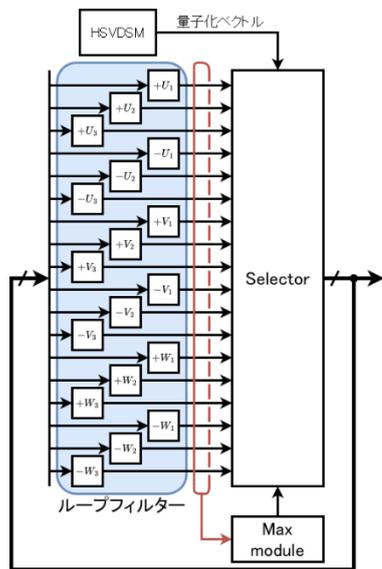


図 7 Full-search dynamic three-phase multi-coil-motor matching の構成図

図 7 より FDTMM は前段の HSVDSM から出力された量子化ベクトル、ループフィルタの積分値、Max module の出力が Selector モジュールに入力される。ループフィルタは任意の次数で、9 コイルの正方向と負方向の駆動頻度を表す為、18 個必要となる。また、Max module はそれらのループフィルタの積分値の内、最大値を求めて Selector ブロックに入力する。Selector ブロックでは、各量子化ベクトルを実現するコイルの駆動パターンをテーブルとして保持し、ループフィルタを用いて、使用頻度が少ないコイルを可能な限り多く使用するコイルの駆動パターンを選択して出力する。

### (3) 動的なコイルパターン生成手法

FDTMM は、コイルの駆動パターンを全て保持することから、回路規模が大きくなるという問題があった。そこで、コイルの駆動パターンを、量子化ベクトルに対して動的に生成する手法を提案する。提案するコイルパターンの生成手法の流れを次の図 8 に示す。

図 8 において、まず HSVDSM から出力された量子化ベクトルから、Phase drive generation を用いて基準となる 3 相の駆動量ベクトルを得る (図 8 ①)。次に、得られた 3 相の駆動量ベクトルに対して、打ち消し磁界を合成することで、7 行 3 列の相の駆動量行列を得る (図 8 ②)。ここで、ループフィルタの積分値 (図 8 ③) から、3 相の

各相と、 $-3 \sim +3$  までの各駆動量における最適な駆動パターンを求める (図 8 ④)。駆動量行列の各要素に対し、各相各駆動量の駆動パターンを当てはめることで、7 行 18 列の駆動パターン行列が得られる (図 8 ⑤)。最後に、駆動パターン行列から使用頻度の少ないコイルを可能な限り多く使用する駆動パターン行を選択して、出力およびループフィルタへのフィードバックを行う (図 8 ⑥)。

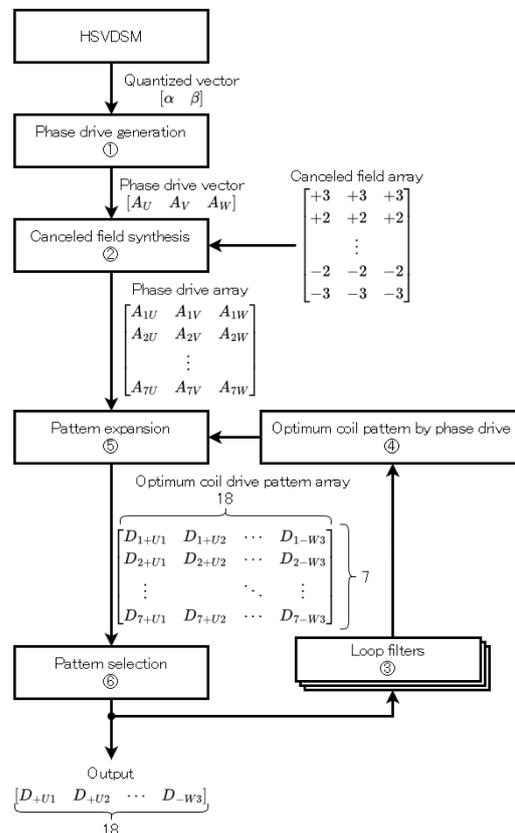


図 8 コイルの駆動パターン生成手法の流れ

本提案手法を用いてコイルの駆動パターンを動的に生成して FDTMM を作成した場合と、従来のコイルの駆動パターンを全てテーブルで保持する手法を用いて FDTMM を作成した場合を比較する。それぞれを Field programmable gate array (FPGA) で合成した場合に使用するルックアップテーブル (LUT) の量を表 1 に示す。

表 1 使用したルックアップテーブルの量の比較

|            | 使用したルックアップテーブルの量 |
|------------|------------------|
| 従来の FDTMM  | 137, 983         |
| 提案する FDTMM | 10, 414          |

表 1 より提案手法を用いることで、LUT を 92.5%削減することができる。

また、従来の  $\Delta \Sigma$  変調器と NSDEM を使用したデジタル直接駆動システムと、提案手法を用いた HSVDSM と FDTMM による高精度駆動システムを実装し、MCM を駆動した場合の比較を行った。

測定には図9に示すように、3相交流を入力し、オープンループ制御を行った場合(図9①)の $\alpha$ 軸電圧と、回転速度と3相電流を用いたベクトル速度制御によるクローズドループ制御を行った場合(図9②)のトルクを比較した。測定条件を表2に示す。

表2 高精度駆動の比較測定の測定条件

| 条件             |              | 値                              |
|----------------|--------------|--------------------------------|
| 電源電圧 [V]       |              | 15                             |
| スイッチング周波数 [Hz] |              | 200,000                        |
| オープンループでの構成    | デジタル直接駆動システム | 2次 $\Delta\Sigma$ 変調器, 2次NSDEM |
|                | 高精度駆動システム    | 2次HSVDMSM, 2次FDTMM             |
| クローズドループでの構成   | デジタル直接駆動システム | 2次 $\Delta\Sigma$ 変調器, 1次NSDEM |
|                | 高精度駆動システム    | 2次HSVDMSM, 1次FDTMM             |
| オープンループ        | 入力周波数 [Hz]   | 12                             |
|                | 振幅 [dBFS]    | -13                            |
| クローズドループ       | 回転速度 [rpm]   | 6                              |
|                | 負荷トルク [N・m]  | 0.5                            |

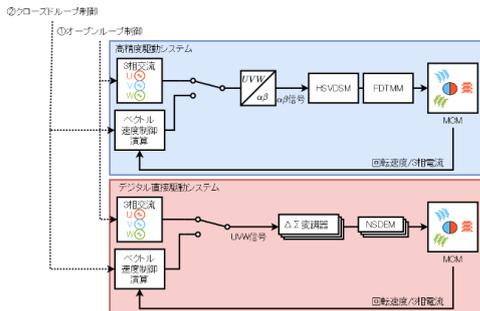


図9 高精度駆動の比較測定のシステム

図9より、オープンループ制御(図9①)を行った場合に得られた $\alpha$ 軸電流のFast Fourier transform (FFT)解析結果を図10に示す。また、クローズドループ制御(図9②)を行った場合に得られたトルクのFFT解析結果を図11に示す。

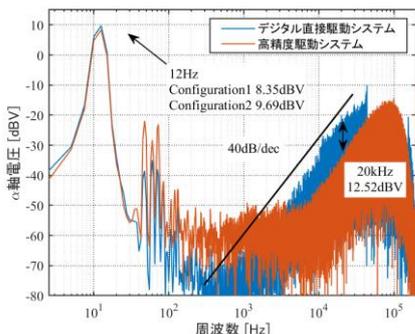


図10 オープンループ制御時の $\alpha$ 軸電圧周波数特性

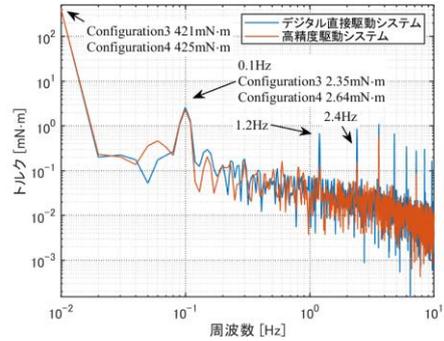


図11 クローズドループ制御時のトルク周波数特性

図10よりHSVDMSMとFDTMMを用いた高精度駆動システムは、従来の $\Delta\Sigma$ 変調器とNSDEMを用いたデジタル直接駆動システムよりも20kHzにおける電圧ノイズを12.52dBV低減していることが確認できる。また、図11より、トルクの基本波を0.1Hzとした時、高精度駆動システムは、従来のデジタル直接駆動システムと比較して、12の倍数次高調波を低減していることが分かる。

#### 4. フェイルセーフ機能

##### (1) 補完磁界生成

MCMの信頼性を高めるための手法として、MCMに含まれるコイルが故障した時、他のコイルで代替することで、故障したコイルを補う補完磁界生成アルゴリズムが提案されている[3]。補完磁界を生成するためのフローを図12に示す。

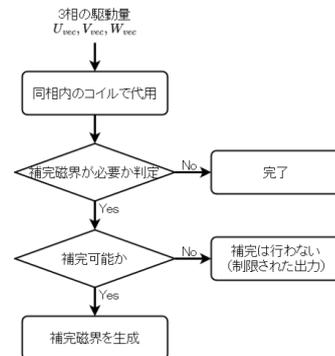


図12 補完磁界生成フロー

図12より、例えば、U相で正方向駆動するコイルが1つ足りないとき、V相とW相のコイルを1つずつ負方向に駆動することで、補完を行うことが可能である。

しかし、この補完磁界生成フローは、1相ごとに1コイルずつ補完可能かを判定することから、2相以上や2コイル以上の補完可能かの判定は複雑化する問題があった。

そこで、3コイル以上の多コイルや3相以上の多相MCMの場合でも、複数の相や複数のコイルに対しても一度に補完磁界を生成できるような手法を提案する。

## (2) 打ち消し磁界を使用した補完磁界生成

提案する補完磁界生成手法を用いることで、2 コイル以上や 2 相以上にわたってのコイルの故障に対しても、打ち消し磁界を一括で生成することが可能である。また、MCM が多コイルや多相化した場合でも単純な拡張で補完磁界生成アルゴリズムを適用可能である。

提案する補完磁界生成手法では、図 8 で用いた打ち消し磁界ベクトルを+3~-3 まで 7 通りをまとめることで得られる Canceled field array を使用する。

提案する補完磁界生成手法を図 13 に示す。3 相の駆動量ベクトルを拡張し、打ち消し磁界ベクトルからなる 7 行 3 列の Canceled field array を加算することで、7 行 3 列の 3 相の駆動量行列を得ることができる (図 13 ①)。得られた 3 相の駆動量行列の中から、MCM において使用可能なコイルで実現可能かつ、打ち消し磁界ベクトルの大きさが少ない行を選択することで、補完磁界を適用した MCM の 3 相の駆動量ベクトルが得られる (図 13 ②)。

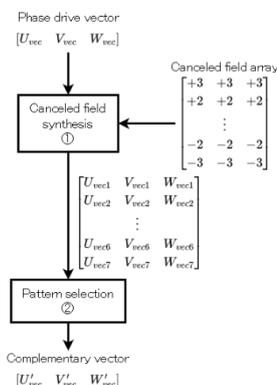


図 13 提案する補完磁界生成手法

提案する補完磁界生成手法を実装して MCM でベクトル速度制御を行い、負荷トルクに対する回転速度を測定した。測定条件を表 3 に示す。また、測定された負荷トルクに対する回転速度を図 14 に示す。

表 3 補完磁界生成手法の測定条件

| 条件             | 値                          |
|----------------|----------------------------|
| 電源電圧 [V]       | 8                          |
| スイッチング周波数 [Hz] | 200,000                    |
| 速度指示値 [rpm]    | 1,000                      |
| 負荷トルク [N・m]    | 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |

図 14 より U 相を 1 コイル制限した場合は負荷トルクが 0.5N・m となると、補完磁界を生成しない場合は回転速度が 35rpm 低下し、965rpm となった。一方で、提案手法を用いて補完磁界を生成した場合、回転速度は 13rpm 低下し 987rpm となり、回転速度の低下を抑制できることが分かった。

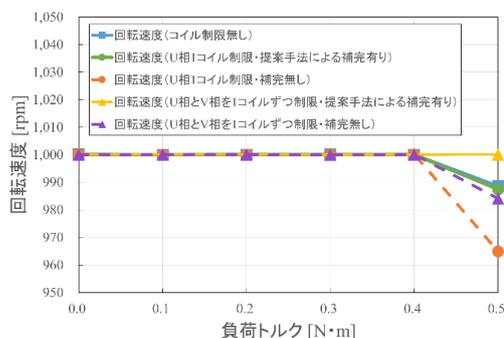


図 14 補完磁界を生成した場合の負荷トルクに対するマルチコイルモータの回転速度

また、U 相と V 相を 1 コイルずつ制限した場合は、負荷トルクが 0.5N・m となると補完磁界を生成しない場合、回転速度は 16rpm 低下し、984rpm となった。一方で提案手法を用いて補完磁界を生成した場合は、回転速度は低下せず 1000rpm を維持できることが分かった。

このことから、MCM のコイルが一部制限された状態でも補完磁界を生成することで出力範囲を補い、出力の低下を抑制できると考えられる。

## 5. デッドタイム補償

モータを駆動するインバータ回路に含まれるブリッジ回路は上下のスイッチング素子は相補的に動作する。この時、ブリッジ回路の出力が切り替わる時、スイッチング素子が同時に ON し、貫通電流が流れるのを防ぐために、デッドタイムと呼ばれる上下のスイッチング素子が両方も OFF となる期間が挿入される。デッドタイムによってモータに奇数次の高調波電流が生じることから、これらを補償手法が提案されている [4] [5]。しかし、この補償手法はパルス幅変調 (PWM) 方式を前提としていることから、本稿ではデジタル直接駆動システムに適用可能なデッドタイム補償手法を提案する。

提案するデッドタイム補償器を追加したデジタル直接駆動システムを図 15 に示す。

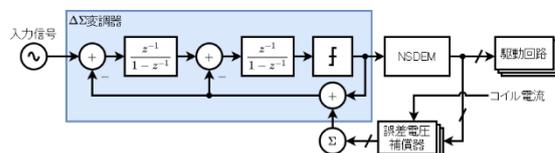


図 15 提案するデッドタイム補償付きのシステム

図 15 より誤差電圧補償器は、NSDEM の各コイルの出力およびコイル電流から補償量を決定し、任意の次数の  $\Delta \Sigma$  変調器 (図 15 では 2 次  $\Delta \Sigma$  変調器を用いている。) のフィードバック経路に合成することで補償を行う。誤差電圧補償器の補償量を表 4 に示す。なお、 $t_d$  はデッドタイム期間、 $t_s$  はスイッチング周期、 $i$  はコイル電流、 $I_{th}$  は電流閾値を表す。

表4 デッドタイム補償量

| 前回の駆動量    | 現在の駆動量 | 誤差電圧補償量                           |
|-----------|--------|-----------------------------------|
| 0         | +1     | $-\frac{t_d}{t_s} (i > -I_{th})$  |
| +1        | 0      | $\frac{t_d}{t_s} (i < I_{th})$    |
| 0         | -1     | $\frac{t_d}{t_s} (i < I_{th})$    |
| -1        | 0      | $-\frac{t_d}{t_s} (i > -I_{th})$  |
| -1        | +1     | $-2\frac{t_d}{t_s} (i > -I_{th})$ |
| +1        | -1     | $2\frac{t_d}{t_s} (i < I_{th})$   |
| otherwise |        | 0                                 |

提案するデッドタイム補償システムに対し MATLAB および Simulink を用いてシミュレーションを行い検証した。3相のΔ変調器には3相交流信号を入力し、デッドタイムをモデル化したコイルに流れる電流をシミュレーションした。シミュレーション条件を表5に、シミュレーション結果を図16に示す。

表5 デッドタイム補償のシミュレーション条件

| 条件             | 値       |
|----------------|---------|
| 振幅 [dBFS]      | -6.02   |
| 入力周波数 [Hz]     | 1,100   |
| スイッチング周波数 [Hz] | 500,000 |
| 閾値電流 [A]       | 0       |
| 電源電圧 [V]       | 48      |
| インダクタンス [H]    | 20 μ    |
| 直列抵抗 [Ω]       | 0.25    |
| デッドタイム [s]     | 250n    |

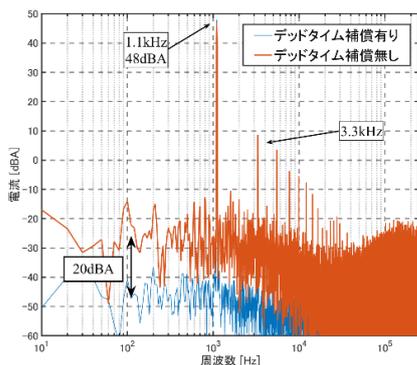


図16 提案するデッドタイム補償によるコイル電流の周波数特性の比較

図16より、デッドタイム補償を使用することで、100Hz時の電流ノイズを20dB低減できるほか、デッドタイムを加えることで発生していた奇数次高調波も低減できることが分かった。

## 6. セグメントパルスシェーピング技術の適用

デジタル直接駆動システムはモータに印加する電圧がノイズシェーピング特性を持つことから流れる電流において高周波帯域に存在する量子化雑音成分がカットされる。一方で、鉄損の低減やコギングレスを目的としたコアレスモータにおいては、コイルのインダクタンスが小さいことから、ノイズシェーピング特性によって高周波帯域に存在する量子化雑音成分が電流として流れるようになる。これは、MCMの駆動精度を低下させるほか、騒音や銅損の増加による効率低下の原因となる。そこで、デジタル直接駆動技術における量子化雑音を低減し、コアレスモータなどの低インダクタンスのコイルを持つMCMに適した制御手法を提案する。

デジタル直接駆動システムにおいて、モータに流れる電流の量子化雑音を低減させるには、ΔΣ変調器のオーバーサンプリング周波数の増加や、量子化器のレベル数を増加させることが挙げられる。しかし、前者は駆動回路のスイッチング損失の増加につながり、後者はモータの大きさなど構造上の制約が存在する。

この時、NSDEMが出力するパルスを時間方向に分割することで、物理的な素子の数を増やさずにレベル数を増加させるセグメント化パルスシェーピング技術(SPST)が提案されている[6][7][8]。しかし、分割数を増やすことでスイッチング回数が増加し、駆動回路のスイッチング損失の増加につながる。

そこで、本稿ではコイルが駆動するパルス幅を変えさせることで、スイッチング回数の増加を抑えつつ、ΔΣ変調器のレベル数を増加させ、量子化雑音の低減を目指したパルス幅可変方式のセグメントパルスシェーピング技術を提案する。提案するパルス幅可変方式のセグメントパルスシェーピング技術を用いたデジタル直接駆動システムを図17に示す。

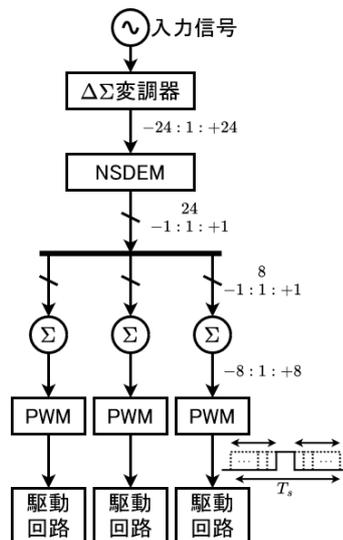


図17 提案するパルス幅可変方式のセグメントパルスシェーピング技術

図 17 は 1 相あたりの分解能を 2.5 ビット増加させた、提案するパルス幅可変方式のセグメントパルスシェーピング技術の構成図である。まず、マルチビット  $\Delta \Sigma$  変調器は -3 から +3 の 7 レベルから -24 から +24 までの 49 レベルへ増加させる。次に 24 個のループフィルタを持つ 3 値駆動型 NSDEM でシャッフリングを行う。これにより得られる 24 個の 3 値信号を 3 つに分割し、8 個の 3 値信号の合計を求めることで、-8 から +8 の 9 レベルの信号が 3 個得られる。これらの信号を PWM で駆動することで、デジタル直接駆動システムの量子化雑音を低減させることが可能となる。

パルス幅可変方式のセグメントパルスシェーピング技術を用いたデジタル直接駆動システムを MATLAB および Simulink でシミュレーションを行い検証した。3 相交流信号を入力し、MCM をオープンループで駆動した時、コイルに印加される電圧の FFT 解析を行った。シミュレーション条件を表 6 に、FFT 解析結果を図 18 に示す。

表 6 パルス幅可変方式のセグメントパルスシェーピング技術のシミュレーション条件

| 条件                                    | 値       |
|---------------------------------------|---------|
| 入力振幅 [dBFS]                           | -4.4    |
| 入力周波数 [Hz]                            | 20      |
| 入力電圧 [V]                              | 48      |
| $\Delta \Sigma$ 変調器, NSDEM 駆動周波数 [Hz] | 500,000 |
| $\Delta \Sigma$ 変調器の次数                | 2 次     |
| NSDEM の次数                             | 2 次     |

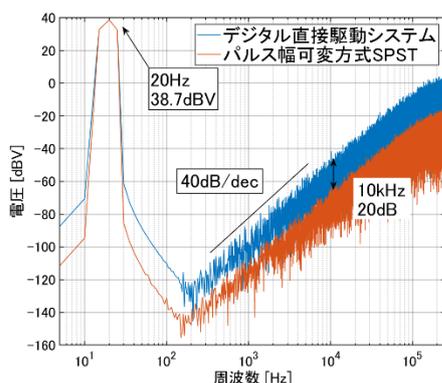


図 16 提案するパルス幅可変方式のセグメントパルスシェーピング技術による U 相コイル電圧の周波数特性

図 16 よりパルス幅可変方式によるセグメントパルスシェーピング技術を用いることで、U 相に印加される電圧のノイズフロアを 10kHz において、20dB 低減できていることが分かる。このことから、モータに流れる電流の雑音を低減でき、銅損によるモータの損失を低減させることができる。

## 7. まとめ

本稿では、MCM の高精度化、高信頼化および高効率化を目的として、MCM の高精度駆動を実現する FDTMM の動的なコイルパターン生成手法やデッドタイムによる電流歪みを補償するための手法、コイルが一部故障しても駆動を続けるための打消し磁界を用いた補完磁界生成手法、MCM に変更を加えずに量子化雑音の低減を実現するパルス幅可変方式によるセグメントパルスシェーピング技術をそれぞれ提案した。

MCM の高精度化に関しては、提案した動的なコイルパターンの生成手法によって、FDTMM の実装に必要な回路規模を削減することで、実装の容易化を行ったうえで、実験から  $\alpha$  軸電圧のノイズフロアを低減し、また MCM のトルクで発生する 12 の倍数次高調波を低減できることが分かった。また、提案したデッドタイム補償システムによって、デッドタイムによって発生する奇数次高調波電流を抑制しつつ、ノイズフロアを低減させることがシミュレーションから確認された。

MCM の高信頼化においては提案した打消し磁界を用いた補完磁界生成手法によって、MCM の一部のコイルの駆動が制限された状態で、負荷トルクが発生しても MCM の速度低下を抑制できることが実験から分かった。

また、MCM の高効率化のために、提案したパルス幅可変方式によるセグメントシェーピング技術は、シミュレーションから MCM に印加される電圧のノイズフロアを低減できることが確認された。

今後の課題として次のことが挙げられる。動的なコイルパターンの生成手法に関しては、他の手法と組み合わせることで駆動精度の向上による性能の向上が行えるかの検証を行いたい。デッドタイム補償システムに関してはテストベンチに対して実装を行い、測定から効果の検証を行いたい。打消し磁界を用いた補完磁界生成手法に関しては、駆動範囲の補償がどこまで行えるかの条件のより詳細な検証を行いたい。パルス幅可変方式によるセグメントパルスシェーピング技術においては、テストベンチに対して実装を行い効率向上の検証を行いたい。

## 謝辞

本稿の作成にあたり、多くのご指導および助言をいただきました法政大学理工学部安田彰教授、および同研究室の皆様へ深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 原島昇：デジタル直接駆動モータシステムの大出力化に関する研究，法政大学大学院紀要. 理工学研究科編，Vol.55, pp.1-6, 2014
- 2) 松尾遥，本山佳樹，石間泉，西勝聡，安田彰：量子化誤差と製造バラツキの影響を低減させた高精度マルチコイルモータの実現，電気学会研究会資料，Vol.17, pp.103-107, 2017
- 3) 吉田建，安田彰：マルチコイルモータの動作不良時における出力最大化の基礎的検討，令和3年電気学会全国大会論文集，pp.203-204, 2021
- 4) 岩路善尚，足塚恭：高トルク&高速応答！センサレス・モータ制御技術，CQ出版社，2017
- 5) 電気学会・センサレスベクトル制御の整理に関する調査専門委員会：ACドライブシステムのセンサレスベクトル制御，オーム社，2016
- 6) 春海豪：セグメントパルスシェーピング技術を用いたデジタル直接駆動型スピーカの構成検討，法政大学大学院紀要. 理工学研究科編，Vol.58, pp.1-8, 2017
- 7) 植田真輝：FIRフィルタを用いたセグメントパルスシェーピング型デジタル直接駆動スピーカ，法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編，Vol.61, pp.1-7, 2020
- 8) 寧飛越：スイッチングロス削減に向けたセグメントパルスシェーピング型デジタル直接駆動スピーカシステム，法政大学大学院紀要. 理工学研究科編，Vol.64, pp.1-9