

マルチコイルモーター駆動用デジタル直接駆動技術の最適化

碓井, 孝憲 / USUI, Takanori

(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・工学研究科編

(巻 / Volume)

59

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2018-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00021553>

マルチコイルモーター駆動用デジタル直接駆動技術の最適化

OPTIMIZATION OF DIGITALLY DIRECT DRIVEN TECHNOLOGY FOR DRIVING

碓井 孝憲
Takanori Usui
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

Multi-bit digital direct drive technology has achieved a low power consumption and high accuracy in the speaker field. Applying this technology to the motor has been researched. However, there is no research about efficiency degradation due to switching by oversampling. In this paper, improved method of power efficiency by broadening frequency characteristics is proposed.

Key Words : *digitally direct driven, multi-coil motor, NSDEM, Noise Shaping Dynamic Element Matching*

1. はじめに

近年、世界的にエネルギー消費量の増加、環境問題への関心が高まり、省エネルギー化への要望が高まっている。図1に国内の電力使用量の結果を示す。モーターは電気エネルギーを機械エネルギーに換える装置である。モーターの消費電力量は全体の半分を占めていて、モーターの高効率化は重要な課題である[1]。そして、加工機に動力としてモーターが搭載されているため、モーターの高精度化が求められる。また、家電製品にモーターが使われるため、モーターの高効率化が求められる。

モーターには複数の種類があるが、そのうちブラシレスDCモーターは、長寿命、省エネ、低騒音、小型、生産性の高さなどの特徴がある。それを基にした、デジタル直接駆動技術を用いたマルチコイルモーターが提案されている。これはフルデジタルスピーカの技術を応用し、アクチュエータをモーターに変えたものである。

本研究では、フルデジタルスピーカの技術に用いる $\Delta\Sigma$ 変調器とNSDEM (Noise Shaping Dynamic Element Matching method)をモーター駆動に最適化することで、高精度駆動と高効率化の実現を目指す。

2. デジタル直接駆動型マルチコイルモーターのシステム

(1) 基本構成

図1にマルチコイルモーターの構成を示す。モーターに取り付けられたロータリーエンコーダからロータの位置を検出し、どの相を駆動させるかを決定する。次に、ロータリーエンコーダ信号の出力間隔から速度を検出し、

制御器で速度制御を行う。そして、 $\Delta\Sigma$ 変調器を用いて、入力信号を、量子化し、各相の駆動させるコイル数を決定する。その後、NSDEMを用いて、出力コイルをシャッフルリングすることで使用頻度を均一化し、製造誤差を低減する。NSDEM後の出力をモーター駆動するHブリッジドライバ回路に入力する。Hブリッジドライバ回路を搭載して、UVW相のコイルを独立で駆動する。ロータが回転すると、ロータリーエンコーダの信号から、再び位置検出と速度検出が行われ、駆動部へフィードバックされる。

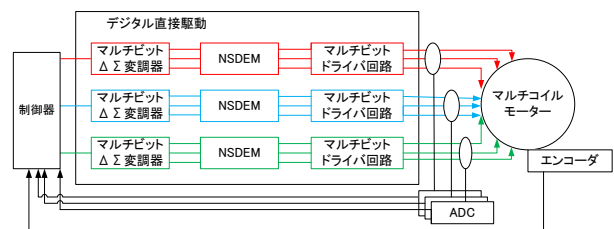


図1 マルチコイルモーターの構成

(2) 基本動作

図2に駆動させるビット数とコイル全体の出力の大きさの関係性を示す。マルチビット制御では、マルチレベルのPDM(Pulse Density Modulation)信号のビット数と同じ数だけドライバ回路を用意し、各コイルに電流を流す。そして、出力値の大きさに応じて駆動させるコイルの数を最適化している。たとえば、高トルクで回転させる場合は、各相全てのコイルに電流を流して大きな磁界を生み出す。反対に、低トルクで回転させる場合は、各相一つのコイルにのみ電流を流す。また、マルチビットでそれぞ

れのコイルを独立して制御できるため、磁界の強さを細かく制御できる。デジタル直接駆動技術では、並列接続してコイルに電流を流している。そのため、マルチコイルの数を増やすことで出力値を増やすことができる。よって、電源電圧を上げずに大出力を得られる。

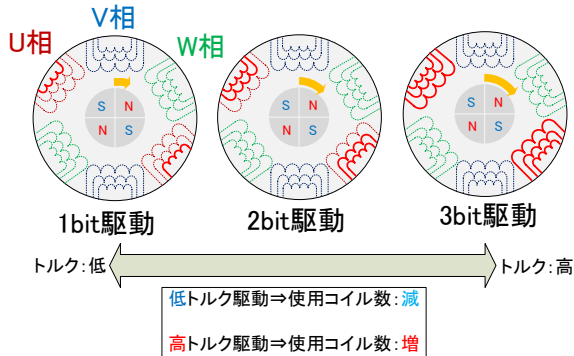


図2 駆動させるビット数とコイル全体の出力の大きさの関係性

(3) PDM 制御

デジタル直接駆動技術では、マルチビット PDM 信号で制御を行っている。図3に PDM 制御での波形の表し方を示す。

出力電圧は、矩形波のパルスの変化によって決めている。パルス幅は出力電圧に関わらず常に一定であり、ある一定の時間におけるパルス密度で出力電圧を表す。よって、入力波形の状態は0, 1の二値で決まり、出力電圧はパルスの0の数が多ければ小さくなり、1の数が多ければ大きくなる。

また、入力信号を変換するのにアナログ回路を必要とせず、デジタル回路のみで構成できる。

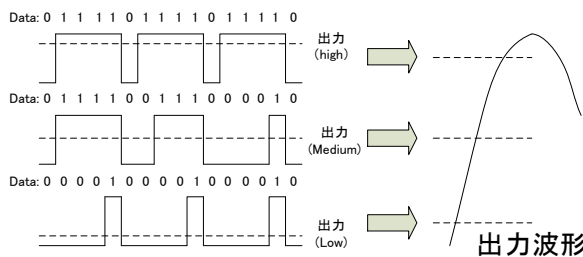


図3 パルス密度変調 (PDM) における入力信号の表し方

(4) ΔΣ変調器

デジタル信号でモーターを直接駆動させるには、駆動しやすい信号に変換する必要がある。ここでは、必要な信号帯域幅をオーバーサンプリングすることで、高精度変換を実現できる、ΔΣ変調器を用いる。

ΔΣ変調器の構成を図4に示す。

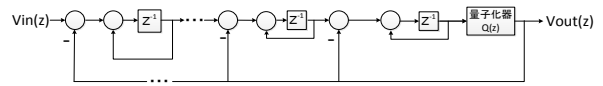


図4 ΔΣ変調器の構成

ΔΣ変調器は積分器で構成されたループフィルタ、量子化器を用いたフィードバック回路から構成されている。入力信号は積分器を通り、量子化器によって量子化される。また、量子化器の出力が入力へフィードバックされ、入力信号との差分が積分されることとなる。

n 次のΔΣ変調器の伝達関数は次式で示すことができる。

$$V_{out}(z) = z^{-n}V_{in}(z) + (1 - z^{-1})^n Q(z) \quad (1)$$

この式から量子化雑音 $Q(z)$ に $(1 - z^{-1})^n$ の伝達関数がかかることがわかる。このとき、入力信号 $V_{in}(z)$ は n クロック遅延されて出力される。

周波数 ω 成分の量子化誤差によるノイズに注目する。そのノイズに遅延 z^{-1} をかけるとノイズ位相が $\exp(j\omega T)$ ずれる。このときクロック周期 T が十分短ければ次式で近似できる。

$$|1 - z^{-1}| = |1 - \exp(j\omega T)| \approx 2\omega T \quad (2)$$

$\omega T \ll 1$ とみなせる低周波領域ではΔΣ変調器の内部で発生した量子化誤差は大幅に低減される。反対に、高周波領域では、ノイズが強調される。

つまり、入力信号付近の不要なノイズ成分を、高い周波数領域へシフトさせるノイズシェーピングが実現される。また、次数を n 次にすれば、 $(1 - z^{-1})^n$ の伝達関数が量子化雑音にかかるため、次数を上げるほど、シェーピング特性が上がる。

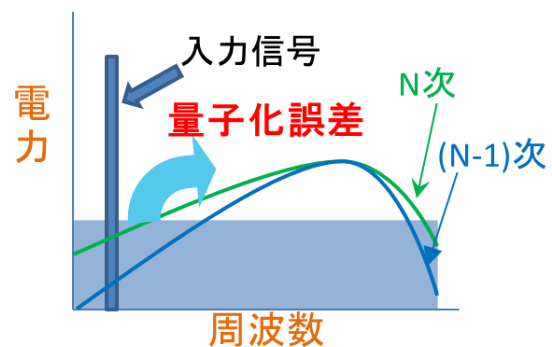


図5 ノイズシェーピング特性

(5) 温度計コード

ΔΣ変調器によって量子化された信号は2進数の信号として出力される。この2進数の信号は重み付けされた信号である。この信号をそのままコイルに入力する場合、

コイルの製造工程において重み付けされる必要がある。しかしコイルの製造工程における重み付けは高い精度が要求される。

そこで、表 1 のように温度計コードという重みづけされていない信号に置き換える。これで、同じコイルを複数使用することが可能となり、製造誤差を緩和することが可能となる。

表 1 温度計コード

10進数	2進数	温度計コード
0	0000	00000000
1	0001	00000001
2	0010	00000011
3	0011	00000111
4	0100	00001111
5	0101	00011111
6	0110	00111111
7	0111	01111111
8	1000	11111111

(6) Noise Shaping Dynamic Element Matching (NSDEM)

温度計コードを用いることで、同一のコイルを複数使用することが可能になった。しかし、ドライバ回路やコイルそのものには製造誤差によるバラつきが存在する。製造誤差によって、出力は理想の線形にはならず、非線形となる。コイルのばらつきはトルクむらの原因となり、効率が劣化する。素子ばらつきによって生じる誤差に対して、シェーピングをかけることで、トルクむらを抑えることが可能となる。

NSDEM のブロック図を図 6 に示す。

温度計コードに変換された $\Delta \Sigma$ 変調器の出力がソートセレクタに入力される。駆動コイル数のデータがループフィルタに入力され、各コイルの使用回数をループフィルタ (n 次の積分器) で、積分する。積分された信号と $\Delta \Sigma$ 変調器出力をソートセレクタで比較し、使用頻度の少ない順に並び替えられ、入力された温度計コードに応じて出力するコイル数を選択する。

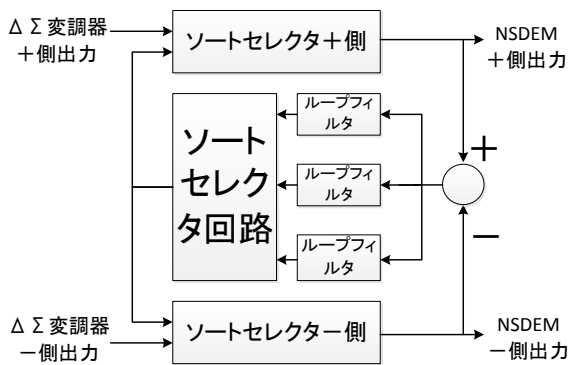


図 6 NSDEM のブロック図

これにより、使用頻度の低いコイルを優先的に使用し、コイルを使用するパターンにシャッフリングをかける。シャッフリングをかけることにより、それぞれのコイルの使用回数が平均化され、ばらつきを抑えることで出力は線形となる。よって、ばらつきを抑え、線形性を確保することで、ノイズを低減することができ、高効率化につながる。

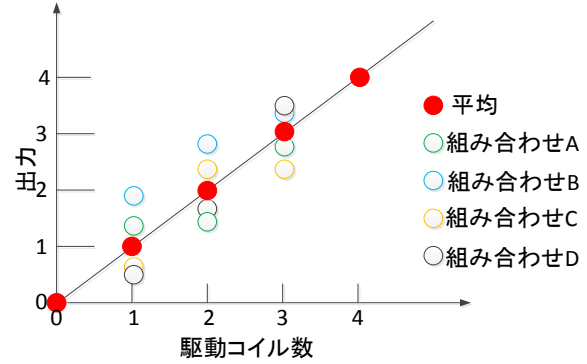


図 7 NSDEM による線形化

NSDEM の等価回路を図 8 に示す。

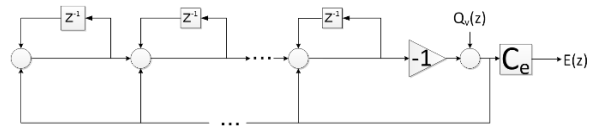


図 8 NSDEM の等価回路

C_e をコイルのばらつき、 $Q_v(z)$ をソートセレクタ、 $E(z)$ を出力誤差とすると、この等価回路の伝達関数は次式で表される。

$$E(z) = (1 - z^{-1})^n C_e Q_v(z) \quad (3)$$

モーターのコイルのばらつきによって、低域にノイズが発生するが、NSDEM は、そのノイズに対し、 $\Delta \Sigma$ 変調器のようなシェーピング特性をもたらす。

さらに積分器を直列接続することで、 $\Delta \Sigma$ 変調器同様、NSDEM の次数を上げることが可能となり、シェーピング特性が上がる。

(7) ドライバ回路

マルチコイルモーター駆動システムでは、モーターのコイルはデジタル信号によって駆動するため、アナログ回路は必要としない。プッシュプルバッファ (D 級増幅段回路) と、デッドタイム生成回路、レベルシフト回路を含んだドライバ IC を使用し、図 9 に示す H ブリッジドライバ回路を使用する。3 パターンの入力信号により、H ブリッジ回路を制御し、コイルへ流す電流を制御することでコイルに発生する磁極を変化させる。また、パルス密度と使用するコイル数を変化させることで磁界の強さを決定する。

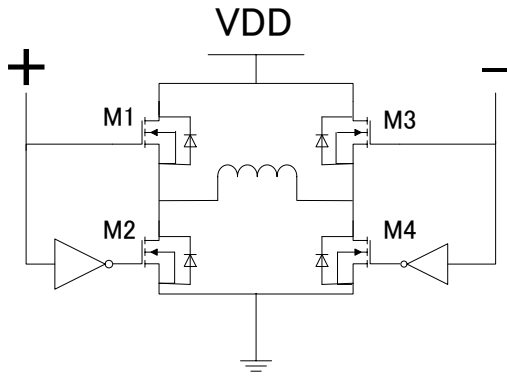


図9 ドライバ回路

表2 ドライバ回路

(+, -)の値	磁極	M1	M2	M3	M4
(1,0)	N	ON	OFF	OFF	ON
(0,1)	S	OFF	ON	ON	OFF
(0,0)	None	OFF	ON	OFF	ON
(1,1)	None	ON	OFF	ON	OFF

3. デジタル直接駆動型モーターにおける $\Delta\Sigma$ 変調器の特性の影響

(1) 信号精度と回転精度の関係性

デジタル直接駆動技術をモーター駆動に最適化することで、高精度駆動と高効率化の実現を目指す。まず、 $\Delta\Sigma$ 変調器の性能を上げて高品質な信号を生成したときの影響を見る。各コイルの巻き線抵抗、自己インダクタンス、相互インダクタンスなどのパラメータが搭載されたマルチコイルモーターの *simulink* モデルを用いてシミュレーションを行った。このとき、マルチコイルモーターから駆動部へフィードバックをかけず、オープンループで、無負荷駆動してシミュレーションした。また *simulink* モデルを使用してシミュレーションしたとき、各コイルの素子ばらつきは0と設定した。

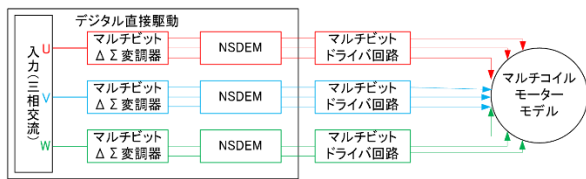


図10 シミュレーションした際の全体システム

表3 シミュレーション条件

入力周波数	$\Delta\Sigma$ クロック周波数	負荷トルク	電源電圧	ロータの極数	各相のコイル数
30[Hz]	100[kHz]	0[N·m]	6[V]	5	3

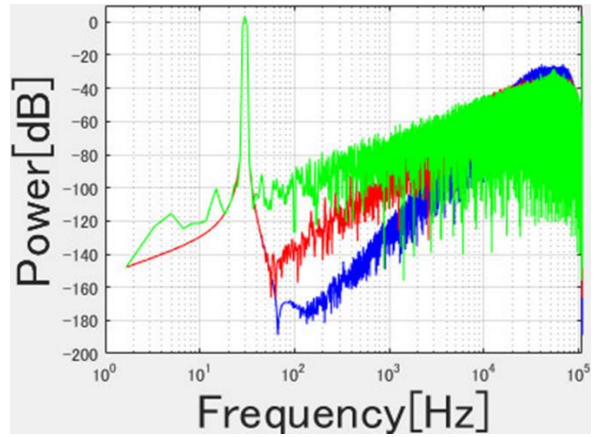


図11 $\Delta\Sigma$ 変調器の信号のスペクトル 緑：1次 DSM, 赤：2次 DSM, 青：3次 DSM

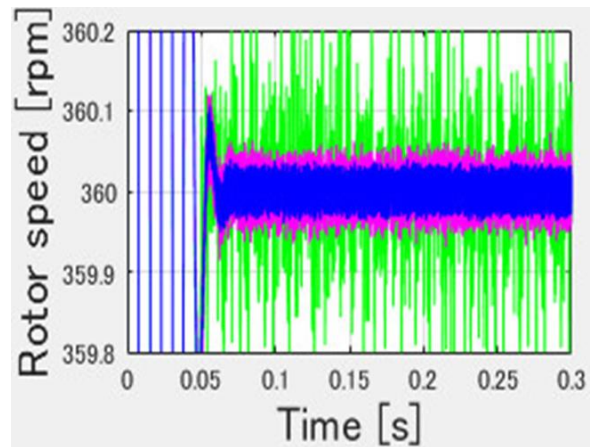


図12 $\Delta\Sigma$ 変調器で駆動したときのモーターの回転速度の変化 緑：1次 DSM, 赤：2次 DSM, 青：3次 DSM

$\Delta\Sigma$ 変調器のシェーピング特性によって信号帯域の量子化誤差が低減されるが、 $\Delta\Sigma$ 変調器の次数によってその特性が強くなる。生成された高精度な信号により、コイルに流れる電流が生成する磁界による回転の精度が上がる事がわかる。すなわち、スピーカー同様、SN比を上げると、高精度駆動が可能になると考えられる。

(2) ドライバ回路の消費電力

マルチコイルモーターに用いる $\Delta\Sigma$ 変調器は信号を加算せず複数のコイルに出力するため、低電圧で駆動可能となっている。しかし、 $\Delta\Sigma$ 変調器は高速サンプリングを行い、細かい制御を行うため、その性能を上げるほどスイッチング回数は増えると考えられる。そこで、マルチコイルモーターを駆動するドライバ回路の消費電力の影響を見る。

そこで、*Ltspice* によるシミュレーションによって、ドライバ回路の消費電力を求める。

今回シミュレーションに使用した $\Delta\Sigma$ 変調器からモーター出力までの回路を図13に示す。

Hブリッジドライバ回路を用いて、マルチコイルを独

立に駆動している。また、マルチコイルモーターは 3 相 3bit (各相のコイルを 3 つに分割) を想定しており、各コイルの自己インダクタンス、相互インダクタンスは実測に基づいた値を使用している。dq 軸座標変換により有効電力、無効電力を算出することで、トルク、回転数を算出できるものとなっている。

$\Delta \Sigma$ 変調器を MATLAB/simulink によって設計、シミュレーションを行った。その $\Delta \Sigma$ 変調器の信号を図 13 の LTspice のドライバ IC の入力へエクスポートし、マルチコイルモーターを駆動するドライバ回路の消費電力を求める。電源からドライバ回路に供給される電力を算出した。その結果から $\Delta \Sigma$ 変調器の特性をもとに検討を行う。ここで、 $\Delta \Sigma$ 変調器の次数を変化させたとき、および NSDEM をかけたときの消費電力の比較を行った。その結果を表 4 に示す。

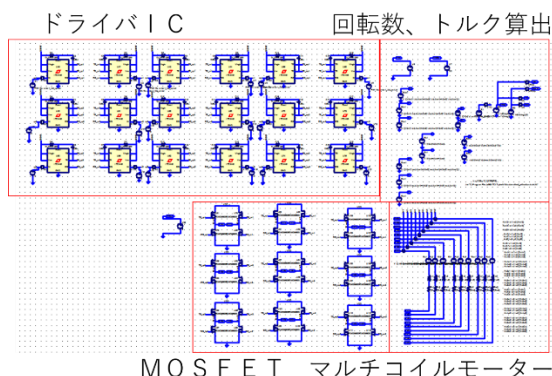


図 13 Hブリッジドライバ回路で駆動するマルチコイルモーター

表 4 $\Delta \Sigma$ 変調器の信号を入力したときのドライバ回路の消費電力

DSMの次数	DSM	DSM+NSDEM
1次	50.1[W]	40.4[W]
2次	64.3[W]	42.8[W]
3次	66.9[W]	43.1[W]

$\Delta \Sigma$ 変調器の次数を 1 次から 2 次上げたとき、ドライバ回路の消費電力が 14.2[W]上昇した。 $\Delta \Sigma$ 変調器のノイズシェーピング特性が高速化したため、PDM 信号のパルス密度が上がることによってスイッチング損失が増えたためと考えられる。

また、NSDEM を用いたときに消費電力が下がるのは、コイルの使用頻度の均一化により、各コイルを駆動するパルスの周波数が高くなり、モーターのインダクタンスにより、パルスの高周波成分による電流が減少し、パルスの

ON の状態の損失を低減できたためと考えられる。

3 相 3 ビットのマルチコイルモーターへ入力するための $\Delta \Sigma$ 変調器の信号を Verilog HDL で生成すると図 14 のようになる。各ビットの出力と位相をずらした出力を示す。このビット数に応じて複数のコイルを駆動する。この場合、一相につき 3 つのコイルで構成されており、出力に応じてコイルの駆動数を決めることができる。しかし、下位と上位のコイルの駆動頻度が異なる。下位のコイルの使用頻度が高くなっていて、パルスの ON の状態の損失を引き起こしている。そこで、NSDEM を用いて使用頻度を均一化させる必要がある。

図 14 の信号をシャッフリングした NSDEM の出力を図 15 に示す。 ± 3 ビットずつで使用頻度を均一化している様子を表している。

VerilogHDL で生成した $\Delta \Sigma$ 変調器の信号をドライバ回路に入力したときの消費電力の影響を表 5 に示す。



図 14 $\Delta \Sigma$ 変調器の出力(out_u_1 から out_u_3 が U 相の+側出力, out_u_1 から out_u_3 が U 相の-側出力, out_v_1 から out_v_3 が V 相出力, out_w_1 から out_w_3 が W 相出力)



図 15 NSDEM の出力

表 5 VerilogHDL で生成した $\Delta \Sigma$ 変調器の信号を入力したときのドライバ回路の消費電力

DSMの次数	DSM	DSM+NSDEM
1次	50.3[W]	40.7[W]
2次	67.2[W]	40.9[W]

マルチコイルモーターでは、マルチビット PDM 信号で制御し、出力値の大きさに応じて駆動するコイルの数を決定する。しかし、入力信号の大きさに合わせて順番にコイルを使用するため、下位ビットのコイルの使用頻度が増加してしまう。その結果、ドライバへ出力する信号が ON の状態が重なって、その期間中常に MOSFET に電流が流れ続ける。電動損失が発生する。そこで、NSDEM を用いることによって、出力値に応じて各ビットのコイルの使用頻度を最適化できる。これにより、電動損失を低減できると考えられる。

4. 消費電力の影響低減方法

NSDEM を用いることによって、出力値に応じて各ビットのコイルの使用頻度を最適化できるが、スイッチング頻度そのものは増えると考えられる。スイッチング頻度が増えることで、PDM 信号のスペクトル分布に高域増加型シェーピング特性が得られる。この高域成分は、通常モーターで使用されるコイルのインダクタンス成分がもつローパス特性により、電流として流れないため、損失が発生しない。しかし、マルチコイルではコイル間に相互インダクタンスが発生する。その影響によって高域のインピーダンスの低下が起り、高域成分を含む電流が流れ効率が劣化すると考えられる。

PDM 信号の高域成分を低減する方法として、 $\Delta \Sigma$ 変調器にノッチ特性を不可させて、ノイズシェーピング特性の広帯域化を行う方法を提案する。 $\Delta \Sigma$ 変調器の零点移動を用いることで、高周波帯のノイズを抑制することで、PDM 信号の高域成分が電流として流れるのを防ぐ。

ノッチ特性を持たせた $\Delta \Sigma$ 変調器の構成を図 16 に示す。

通常の $\Delta \Sigma$ 変調器は、零点 (NTF の値が 0 になるときの周波数) が全て 0、つまり DC に集中している。ここで、通常の $\Delta \Sigma$ 変調器のループフィルタ内にフィードバックゲインを追加することで、零点を DC 以外に配置させることができる。そしてノッチ特性を持ったループフィルタとなる。また、 $\Delta \Sigma$ 変調器の安定性を確保したゲイン係数をそれぞれ表 6 に示す。

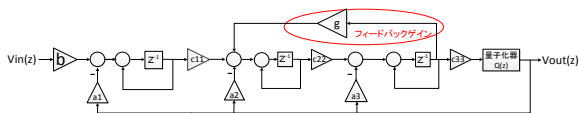


図 16 3次 $\Delta \Sigma$ 変調器

表 6 ゲイン係数 ($\Delta \Sigma$ 変調器)

ゲイン名	b	c11	c22	c33	a1	a2	a3	g
数値	-1	1	1	-1	-1	-3	-3	-0.00036

前述の $\Delta \Sigma$ 変調器により、再量子化されたデジタル信

号は、重みづけされていない信号であるため、複数のドライバで直接駆動することができる。

しかし、マルチコイルモーターで使用するコイルには製造誤差によるばらつきが発生する。

分割されたコイルを駆動する際に素子ばらつきの影響を受けることが予想される。

ミスマッチの影響を低減するため、ノッチ特性型 NSDEM を設計した。

$\Delta \Sigma$ 変調器のミスマッチシェーパの劣化を防ぐために、図 17 のようなループフィルタを設計した。

素子ばらつきの影響で発生するノイズに対し、高次のノッチ特性を持つ NSDEM を設計し、このノイズを低減させる。

NSDEM のループフィルタには $\Delta \Sigma$ 変調器と同様に高周波帯域のノイズを低減するため、フィードバックゲイン g を付加して極を移動させている。

子のループフィルタに各選択信号をフィードバックさせることにより、ノッチ特性型 $\Delta \Sigma$ 変調器と同様の特性を持つミスマッチシェーパを実現している。

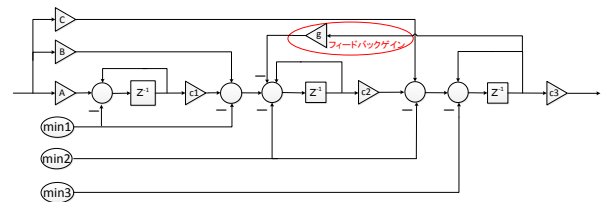


図 17 3次 NSDEM のループフィルタ内部

表 7 ゲイン係数 (NSDEM)

ゲイン名	c1	c2	c3	A	B	C	g
数値	0.0934	0.2766	1.3966	0.022	0.045	0.1365	0.0013

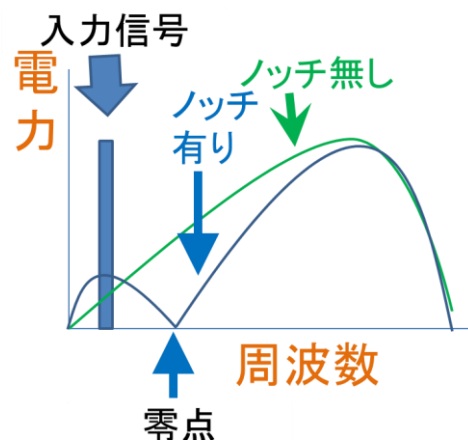


図 18 ノッチ特性を不可させた $\Delta \Sigma$ 変調器の周波数特性

5. シミュレーション結果

シミュレーションによる影響の低減方法として、ドライバ回路に入力するため信号として、通常のローパス型 $\Delta\Sigma$ 変調器と、零点 2 つを 300[Hz] に配置させてノッチ特性を不可させた広帯域ローパス型の 3 次 $\Delta\Sigma$ 変調器及び NSDEM からの出力を用いることで、PDM 信号の高周波帯のノイズの抑制効果を確認できるようにした。用いた信号のスペクトル特性を図 19 に示す。図 16 のフィードバックゲインが $g=0$ のとき、ローパス型シェーピング特性を持つが、 $g=0.0013$ のときに 300[Hz] の帯域に極が移動しているのがわかる。そして、 $\Delta\Sigma$ 変調器の零点移動を用いることで、ノイズシェーピング特性の広帯域化を行い、PDM 信号の高周波帯のノイズを抑制していることがわかる。

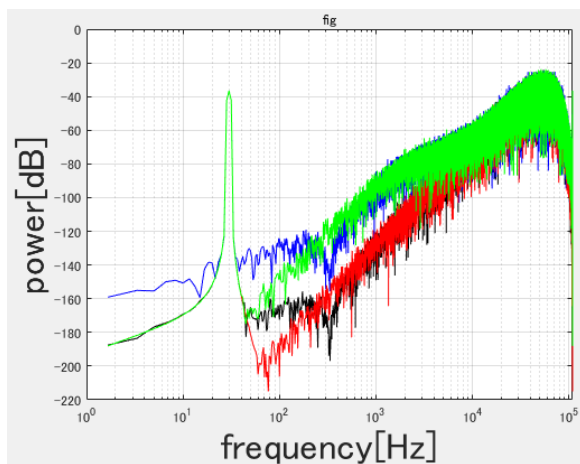


図 19 $\Delta\Sigma$ 変調器の周波数特性 赤：3 次 $\Delta\Sigma$ 変調器，黒：3 次 $\Delta\Sigma$ 変調器+NSDEM，緑：ノッチ特性型 3 次 $\Delta\Sigma$ 変調器，青：ノッチ特性型 3 次 $\Delta\Sigma$ 変調器+3 次 NSDEM

変調器へ入力する \sin 波の振幅をフルスケールの 1/100 に設定し、変調器の信号を生成した。その信号を先述の Ltspice のドライバ回路へ入力した。これは、振幅を小さくすることによって、ON 状態の損失を減らして、スイッチング損失の影響をわかりやすくするためである。

そのときのドライバ回路の消費電力を表 8 に示す。

表 8 ドライバ回路の消費電力

振幅	周波数	ノッチ	3次DSM	3次DSM+3次NSDEM
1/100	100[kHz]	無	11.6[W]	20.2[W]
		有	10.5[W]	11.2[W]

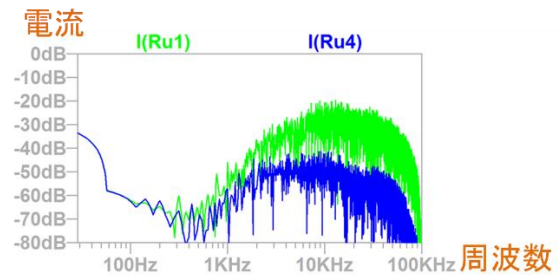


図 20 $\Delta\Sigma$ 変調器+NSDEM をドライバに入力した際のモーターに流れる電流のスペクトル 緑：ノッチ特性無し 青：ノッチ特性有り

NSDEM によって、スイッチング頻度が増えたことが確認できた。また PDM 信号のスペクトル分布に高域増加型シェーピング特性が確認でき、高域成分を含む電流が流れ効率が劣化することが確認できた。

ノッチ特性を付加させて、ノイズシェーピング特性の広帯域化を行うことで、PDM 信号の高周波帯のノイズを抑制している。

図 20 によって高域成分を含む電流が低減でき、消費電力も低減できるのも確認できた。

6. まとめ

マルチコイルモーターに $\Delta\Sigma$ 変調器の信号を入力し、 $\Delta\Sigma$ 変調器の特性によるモーターの特性への影響を見た。素子ばらつきの影響がない状態において、 $\Delta\Sigma$ 変調器の次数を上げることで、回転むらが低減できた。したがって、素子ばらつきによる影響を低減できれば、SN 比改善によって、回転むらが低減できるようになる。つまり、スピーカー同様、SN 比改善によって、高精度駆動が可能になると考えられる。

$\Delta\Sigma$ 変調器は高速サンプリングを行い、細かい制御を行うため、その性能を上げるほどスイッチング頻度が増えたことが確認できた。スイッチング頻度が増えたことにより、PDM 信号のスペクトル分布に高域増加型シェーピング特性が確認でき、高域成分を含む電流が流れ効率が劣化することが確認できた。

ノッチ特性を付加させて、ノイズシェーピング特性の広帯域化を行うことで、高周波帯のノイズを抑制し、高域成分を含む電流による消費電力が低減できるのも確認できた。

また、 $\Delta\Sigma$ の次数の変更により、ループフィルタ内部の積分器の構成を変えずに、積分器の係数のみ変えることで、低消費電力化と高精度化を両立できることも確認できた。

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なるご指導、助言をしていただいた安田彰教授に書く感謝申し上げます。また、研究室の環境の維持管理を行ってくださった吉野理貴様、様々な協力を頂いた同研究室の皆様にも深く感謝致します。

参考文献

- 1) 財団法人新機能素子研究開発協会, “電力使用機器の消費電力に関する現状と近未来の動向調査”, 2009
- 2) 安田彰, 和保孝夫, ” $\Delta\Sigma$ 型アナログ/デジタル変換器入門”, 丸善/WILEY, 2007
- 3) 山口圭, ” デジタル直接駆動型スピーカ技術を用いたモータ制御に関する研究”, 2011
- 4) 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”, 2013
- 5) 松尾遥, ” 量子化雑音と製造誤差による素子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”, 2016
- 6) 安田彰 他” Noise Shaping Dynamic Element Matching Method”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集(1996)
- 7) 松尾遥, et al. : マルチコイルモータのモデルに関する一提案, 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集(CD-ROM),2015
- 8) Matsuo, H. Motoyama, Y. Yasuda, A. :Realization of High Precision Multi-coils-motor, Future Energy Electronics Conference, 2015 IEEE 2nd International, pp.1-5,2015
- 9) Matsuo, H. et al. :Driving a High-Precision Multi-coils-motor by Reducing an Influence of Manufacturing Variations, Journal of Energy and Power Engineering, Vo1.11, No. 1, pp. 48-55, 2017
- 10) 倉持大悟 : デジタル直接駆動技術の三相同期電動機への適用, 電気学会研究会資料, pp21-26, 2013