

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420250

研究課題名(和文) 巻線を複数に分割したブラシレスモータのベクトル型 駆動方式の検討

研究課題名(英文) A vector delta-sigma motor driving method for a multi-coil brush-less motor

研究代表者

安田 彰 (YASUDA, Akira)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30339501

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)：本研究では、従来の3相モータの各コイルを複数に分割し、この分割したコイルを我々が提案しているデジタル調節駆動技術を用いて駆動することにより、低電圧電源で高出力・高効率なモータを実現した。また、分割した各相のコイルをノイズシェーピング・ダイナミック・エレメント・マッチング法(NSDEM)を適用することで、コイル間の素子値や位置ばらつきの影響の低減を実現した。さらに、回転磁界を発生させる際に、各相全てのコイルすべてを選択対象とする新しいNSDEMを提案し、各相間のばらつきの影響も低減することを実現した。これらにより、低トルク変動のモータを実現することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：A novel three-phase motor, whose coils are divided by several sub-coils, and digitally direct driven method for the motor have been proposed. The motor can realize high power, high efficiency, and low power supply motor system. The performance degradation caused by mismatch among sub-coils are improved by using a noise shaping dynamic element matching method (NSDEM) proposed by us. Moreover, a degradation caused by a mismatch among the three phase coils are also improved by proposed new NSDEM for whole coils consisting a three-phase motor, which controls driving coils in order to realize rotating magnetic field using all three-phase sub-coils. A low torque ripple and high-power efficiency with low power supply motor system can be available by using proposed method.

研究分野：工学

キーワード：ブラシレスモータ 電気機器工学 ミスマッチシェーパー コイル 分割 低電圧 高効率

1. 研究開始当初の背景

我々は、基盤研究(C)平成16~18年度、「デジタル信号直接駆動型スピーカの解析と高性能化」および基盤研究(C)平成19~20年度、「積層分割構造電気-音響変換器を用いたデジタル直接駆動スピーカの高性能化」、基盤研究(C)平成23~25年「1kWデジタル直接駆動大電力スピーカシステムの高精度/効率化と電気機械系への適用」にて研究を進め、従来にないデジタル直接駆動スピーカ(DDDSP)を提案し、構成方法の確立、実証を行ってきた。我々の提案した手法では、アナログアンプやデジタル-アナログ変換器を用いることなくデジタルデータを直接音波に変換することが可能となり、スピーカを用いたシステムの高性能化、高効率化、小型化を実現した。ここで得られた技術は、スピーカのみならず様々なアクチュエータをデジタル信号で高精度に駆動するデジタル直接駆動技術(DDDM)として用いることが可能である。

一方、動力用から制御用まで広く用いられているモータは様々な機器に応用され、その消費電力は国内の総消費電力の40%以上になるとの報告もある(MoterSummit2008)。我々は、JST研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラムA-STEPフィージビリティスタディステージシーズ顕在化タイプ2013年、課題名「デジタル直接駆動マルチコイル・モータシステム技術の研究開発」にて、ブラシレスモータのコイルを複数に分割したマルチコイルモータを提案し、入力に応じてこの分割されたコイルの駆動数を制御することで、モータ駆動電力効率を改善するデジタル直接駆動モータ(DDDMO)を研究し成果を得てきている。

DDDSPでは、入力信号に応じて最適なコイル数を決定し、ノイズシェーピング・ダイナミック・エレメント・マッチング法(NSDEM)でスピーカの複数のコイルが有する mismatches の影響を低減することで、高精度な音響信号を再生することを可能としている。

一方、3相モータでは、3相分のコイルが円筒状のロータを包むように物理的に巻かれている。各相のコイルは少しずつ位置をずらして巻いてある場合(分布巻)や飛び飛びの位置に巻かれ直列接続されている。これらの物理位置はコイルを巻く製造精度で決まっており、従来の3相モータにおいては、3相のコイルが発生させる磁力線の角度は正確な120度ずつの変位からわずかにずれている。また、コイルのコアの形状からモータのロータ位置によりロータが受ける力に変化が生じトルク変動などの原因となる。トルク変動は高精度な切削加工機などで問題となっており、これまではモータ本体の構造などの工夫による改善が行われている。一方、3相モータにDDDMを適用するには、3相コイルの各相にそれぞれDDDMを用いれば良

い。つまり、モータの各相のコイルを分割したサブコイルを、NSDEMを用いて選択することで、分割された各コイルのインピーダンス等のずれの影響を低減することが可能である。しかし、この方法では、3相の各相間のずれの影響を除去することはできない問題があった。

2. 研究の目的

本研究は、我々が提案している従来のブラシレスモータの1巻線を複数に分割したマルチコイルモータを用いることで、モータのトルク、速度、位置制御特性、電力効率の改善を目的とする。この実現のためにデジタル直接駆動技術を応用し、その特性を大幅に改善する方法を研究する。提案する方法では、従来とは異なりモータを構成する従来のコイルを分割し、これを個別に制御する。このコイルの駆動数を変更することによりモータのトルク-速度特性を可変することが可能となる。さらにコイル位置の誤差によるトルク変動を低減するため、コイル位置の誤差および素子値誤差の影響を低減するNSDEM、3相の駆動信号を内部ベクトル量としたベクトル型 $\Delta\Sigma$ 変調器を提案し、トルク変動、速度変動の大幅な低減および電力効率の改善を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、従来の3相ブラシレスDCモータを直接デジタル信号で駆動し、電力効率、トルク-速度特性、トルク変動の改善を目指すものである。これを実現するため、3相の各相のコイルを複数のサブコイルに分割し、この分割したコイルをデジタル信号で直接On-Off駆動する。このコイルの選択方法が本方式のキーになる。まず、我々がこれまで提案しているDDDM方式を直接適用し、その得失を検討する。その上で、モータのコイルの巻き方の特徴を活かしたNSDEMの提案を行う。次に、コイルが3つある3相モータの特徴を活かした、DDDMの実現方法を探る。具体的には、3相の情報をベクトル情報とし、サブコイルの選択数を決定するベクトル型 $\Delta\Sigma$ 変調器の提案、選択位置を決定する位置情報、3相情報を活かしたNSDEMの提案を行う。これらを効率的に行うため、モータ系のシステムのモデルの抽出、これを用いた設計、FPGAによる実装を行う。

(1)従来のブラシレスDCモータおよび各相のコイルを分割したDDDMO用モータの基本特性の測定、評価、モデル化

DDDMOでは、各相のコイルを分割したモータを用い、出力に応じて使用する分割されたコイル数を変化させる。これにより動的にモータの特性を変化させることが可能となり、速度-トルク特性等を改善することが期待される。また、出力が低い場合は分割された一部のコイルを用いることによりドライブTr.等の電力損失を低減し、電力効率を改善する

ことができる。一方、分割されたコイルそれぞれのコイル長やインピーダンスなどのパラツキが制御信号からトルクへの変換特性を劣化させることが予想される。本研究では分割された各相のコイルを動的に切り替えることでトルク変動を抑圧することを目的としている。本研究を実現するためには、各相のコイルを分割したモータの特性を正確に把握しておく必要があり、まず実験により提案するモータの電気的特性、電気-機械変換特性を測定する。また、リファレンスとして従来のモータの諸特性を測定評価しておく。さらに本提案書で示した新しいシステム実現のためには、実測で示された特性を表現したシミュレーションおよび数学的モデルが必須となる。このため、実験、評価、解析から、これらの電気系、機械系の特性を表わすモデルの構築を行う。DDDMO システム全体の検討を進めるには、電気系、機械系を含めたシミュレーションを行う必要があり、このためにこれらを含むシステムモデルの構築を行う。

(2)各相別に NSDEM を用いた場合における各相のサブコイルの素子値パラツキによる影響低減効果の確認、問題点の解決方法の検討

抽出したシステムモデルを参考に、3相の各相のコイルを分割しこれらのサブコイルを、NSDEM を用いて駆動するシステムを設計する。シミュレーションによって、このシステムの基本特性の評価を行い、問題点の抽出を行う。3相のコイルを M 個に分割することにより、各サブコイルを $1/M$ の電圧で駆動した場合でも従来と同等の出力トルクが得られることを確認する。また、コイルの分割により小出力（低トルク）時における電力が削減され、スイッチング駆動時のモータ駆動成分以外の成分（PWM のキャリア成分に相当）が大幅に低減されていることを確認する。一方、NSDEM により、分割されたコイルの各サブコイル長、インピーダンスにばらつきがあった場合においても、これによる出力電力への影響は $1/100$ 程度に低減されるように設計し、その効果についても確認する。

(3)サブコイルの位置による誤差の影響の明確化

(2)の方法で分割された1相内でのコイル位置のパラツキの影響は、NSDEM により高い周波数にノイズシェーピングされ、この高い周波数に移動させたパラツキによるトルク変動は、モータのロータなどの機械系のローパスフィルタ特性により、その影響は実質的に問題とならなくなると予想される。一方、3相の巻線の位置に理想位置からの誤差があると、この手法では各相間のパラツキに対してはノイズシェーピングがかからず、トルク変動が生じると思われる。これらの効果をシミュレーションおよび実測により確認し、定量化する。

(4)3相 (U, V, W) を加えたモータのコイル全体を対象とした NSDEM 実現方法の提案

本研究では、3相の1つのコイルを分割し、このコイルに対する選択の手法を検討している。3相モータ全体には、3相 (U, V, W) 分のコイルがあり、これらを一括して選択することにより、3相間のコイルの素子値、位置の影響を低減できる可能性が高い。しかし、このためにはある相の出力を決めるためのコイルの選択を行う際に、別の相のコイルを選択することで素子値等の影響を低減する必要が生じる。この際、最終的に3相に流れる電流で生じる磁力を、本来必要な磁力となるように行う必要がある。3相システムでは、2次元平面における回転磁界を3つのコイルを用いて生成する構造となっており、平面次元数2よりも冗長になっている。このため同じ磁力を生成できる U, V, W の組み合わせは無数に存在する。この点を利用し、3相の出力磁力を変化させず誤差の影響だけを低減する方法を検討する。

(5)3相 (U, V, W) の信号をベクトル値としベクトル値を量子化するベクトル型 $\Delta\Sigma$ 変調器の考案

従来のインバータでは、3相のコイルを駆動するそれぞれの電圧を PWM 変調して生成している。一方、(5)で検討する NSDEM を用いるためには、3相すべての情報を元に分割されたコイルの選択を行う必要がある。これを効率的に実現するため、3相のコイルを駆動する信号を振幅および位相のベクトル信号に変換し、このベクトル信号に最も近い U, V, W のコイル駆動数を決定するベクトル量子化器を用いるベクトル型 $\Delta\Sigma$ 変調器を考案する（図2）。従来のインバータの各相の出力は1電源で駆動する場合、0、もしくは V_{dd} （電源電圧）の2値になる。一方、提案方式では U, V, W の各コイルを m 分割しているため、等価的に $0, V_{dd}, 2 \times V_{dd}, 3 \times V_{dd}, \dots, m \times V_{dd}$ のマルチレベル出力が可能となる。これはマルチレベルの PWM と等価となり電力効率の大幅な改善が期待できる。また、本方式では電源電圧は1つで良く、システムの小型化にも貢献できる。

4. 研究成果

(1)従来のブラシレス DC モータおよび各相のコイルを分割した DDDMO 用モータの基本特性の測定、評価、モデル化

実験により提案するモータの電気的特性、電気-機械変換特性の測定を行った。次に、上記の実測結果で示された特性を表現するモデルを提案した。このモデルでは、機械系、電気系を伝達関数ベースでモデル化し、これらを接続することでマルチコイルモータのモデルを構成している。

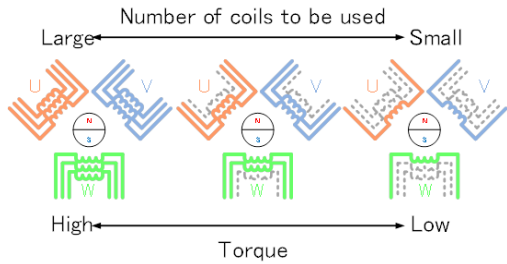


図 1 マルチコイルモータの駆動方法

(2)各相別に NSDEM を用いた場合における各相のサブコイルの素子値バラツキ, 位置ばらつきによる誤差の影響低減効果の確認, 問題点の解決方法の検討

抽出したシステムモデルを参考に, 3 相の各相のコイルを分割しこれらのサブコイルを, NSDEM を用いて駆動するシステムを設計した(図 2). このシステムの基本特性の評価を行い, 3 相のコイルを M 個に分割することにより, 各サブコイルを $1/M$ の電圧で駆動した場合でも従来と同等の出力トルクが得られことを確認した(図 1). コイルの分割により小出力(低トルク)時における電力が削減されることを確認した.

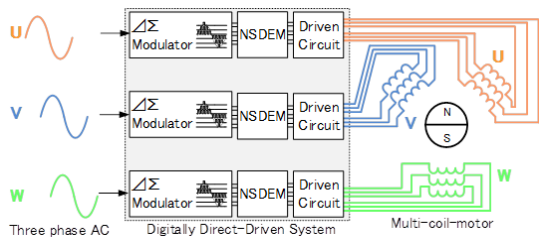


図 2 提案する $\Delta\Sigma$ 変調器及び NSDEM を用いたマルチコイルモータ駆動方式

(3)サブコイルの位置による誤差の影響の明確化

(2)の方法で分割された 1 相内でのコイル位置のバラツキの影響を, NSDEM により高い周波数にノイズシェーピングさせられることを確認した. 3 相の巻線の位置に理想位置からの誤差があると, この手法では各相間のバラツキに対してはノイズシェーピングがかからず, トルク変動が生じることを確認した.

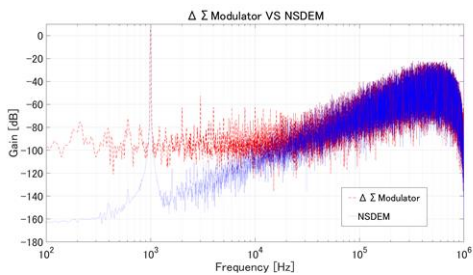


図 3 NSDEM によるコイルの誤差による影響の低減

(4) 3 相 (U, V, W) を加えたモータのコイル全体を対象とした NSDEM 実現法

NSDEM は各コイルの使用回数を均一化することで素子バラツキの影響を低減している. そこで使用回数の均一化をより早めるために, 1 つの相の磁界を 2 つの相の磁界を合成することで再現する信号処理である Dynamic Three-phase Multi-coil-motor Matching (DTMM) を提案した. 例えば図 4(a)のように U 相のコイルに正の電流を流した際に生じる磁界と, (b)の様に V 相と W 相のコイルに負の電流を流した際に生じる合成磁界の向きと大きさは理想的には等しくなる. そのため U 相成分を表す組み合わせは従来の NSDEM の $U1, U2, U3$ の 3 通りに加えて (b)の様な 2 相を用いる組み合わせを加えることで, 1 2 通りに拡大される. これは U 相だけでなく, V 相と W 相も同様に 1 2 通りの組み合わせが存在する. 3 相の $\Delta\Sigma$ 変調器から受け取った信号を基に各相がこの 1 2 通りの中から使用回数の少ないコイルを使用している組み合わせを出力することで, 図 5 の様にバラツキの平均を出力することが可能となる.

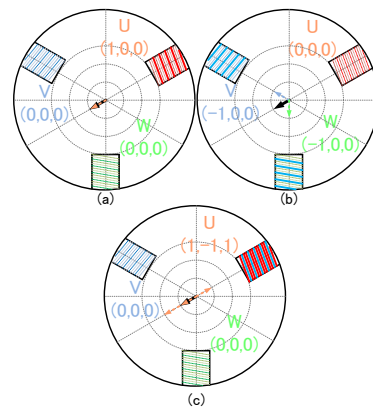


図 4 各相の組み合わせを用いた界磁

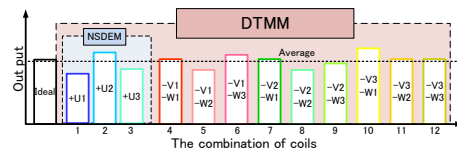


図 5 DTMM による誤差の影響低減効果

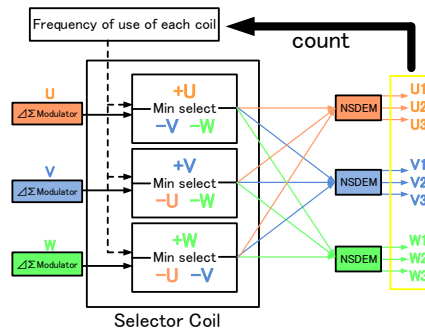


図 6 DTMM の構成

図 6 に DTMM の構成図を示す。各コイルの駆動回数をループフィルタによってカウントしている。前段の各相の $\Delta \Sigma$ 変調器によって 3 値での駆動信号を受け取る。例えば U 相の $\Delta \Sigma$ 変調器から +1 の信号を受け取った際にそのまま U 相を駆動するか、V 相と W 相を -1 としして出力するかをセレクタ回路が判断する。判断する基準となるのはループフィルタより出力される使用回数である。セレクタ回路では使用回数の少ない相を選択し、後段に NSDEM を搭載することで各相の中で使用回数の少ないコイルを選択する。

図 7 に、この DTMM を用いた場合のモータ駆動信号のスペクトルを示す。従来の NSDEM を用いた場合に比べトルク変動の原因となる帯域外成分を 10dB 程度低減されていることが分かる。

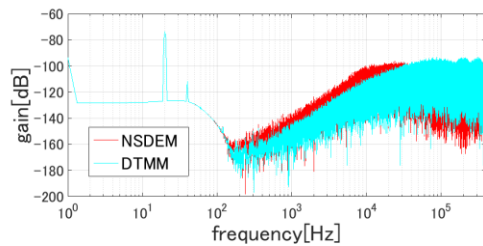


図 7 DTMM のシミュレーション結果

(5)3 相 (U, V, W) の信号をベクトル値としベクトル値を量子化するベクトル型 $\Delta \Sigma$ 変調器の考案

図 8 に提案する空間ベクトル型 $\Delta \Sigma$ 変調器 (SVDSM) のブロック図を示す。SVDSM は 2 つの $\Delta \Sigma$ 変調器で構成されており、それぞれ積分器、量子化器を持つ。積分器への入力はベクトル制御器内の dq- $\alpha\beta$ 変換器の出力である $v_{\alpha}^*, v_{\beta}^*$ と量子化器の出力 $v_{\alpha f}, v_{\beta f}$ の差分であり、入出力間の誤差と等しい。積分された誤差は v_{α}', v_{β}' の直交座標での位置によって対応するインバータ駆動信号とフィードバック信号が量子化器から出力される。

図 9 に提案量子化法を示す。一般的な空間ベクトル図 V0 から V6 を母点としボロノイ領域に分割する。そのボロノイ境界を閾値として破線で示している。量子化器の入力である v_{α}', v_{β}' は大きさと偏角に変換され、その位置に対応したインバータ駆動信号、その時の $\alpha\beta$ の値であるフィードバック信号が出力される。この対応表を表 1 に示す。このようにすることで $\Delta \Sigma$ 変調器と同様に空間ベクトル量子化器で発生した量子化誤差に $(1 - Z^{-1})^2$ の伝達関数をかけ、シェーピング特性を得ることができる。

提案するシステムの各変調器の出力波形シミュレーション結果を図 10 に示す。また、この結果の FFT 結果を図 11 に示す。各相に $\Delta \Sigma$ 変調器を用いた場合と同様に量子化誤差に対してノイズシェーピングが実現されていることが確認できる。また、従来の PWM

方式に比べ大幅に帯域外雑音が低減されていることも確認された。

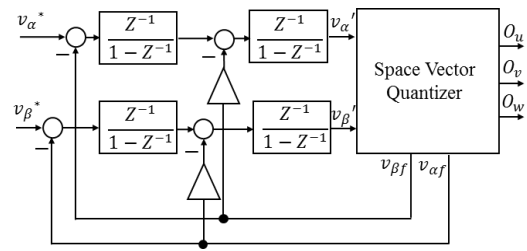


図 8 空間ベクトル型 $\Delta \Sigma$ 変調器

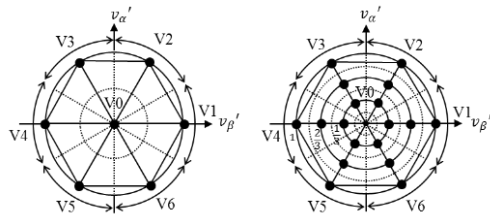


図 9 空間ベクトル量子化

左 : 1bit 右 : 3bit

表 1 ベクトル量子化レベルおよびフィードバック信号対応表

Vector	Output			Feedback	
	O_u	O_v	O_w	$v_{\alpha f}$	$v_{\beta f}$
V1	1	-1/2	-1/2	V_{dc}	0
V2	1/2	1/2	-1	$V_{dc}/2$	$\sqrt{3}V_{dc}/2$
V3	-1/2	1	-1/2	$-V_{dc}/2$	$\sqrt{3}V_{dc}/2$
V4	-1	1/2	1/2	$-V_{dc}$	0
V5	-1/2	-1/2	1	$-V_{dc}/2$	$-\sqrt{3}V_{dc}/2$
V6	1/2	-1	1/2	$V_{dc}/2$	$-\sqrt{3}V_{dc}/2$
V0	0	0	0	0	0

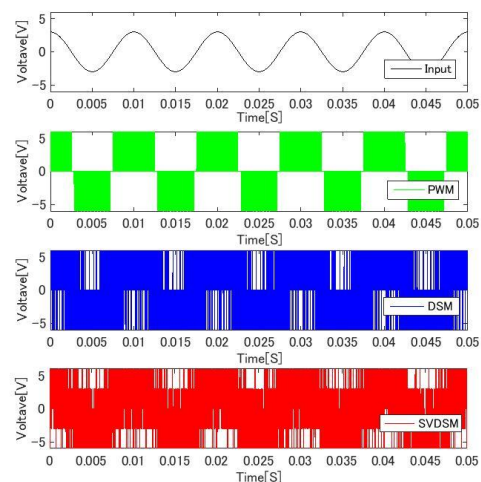


図 10 各変調器の出力波形のシミュレーション結果

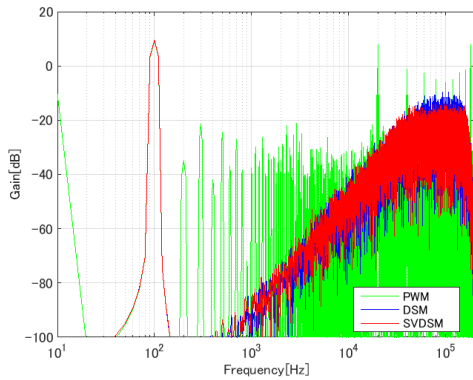


図 11 出力スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) Haruka Matsuo, Yoshiki Motoyama, Satoshi Saikatsu, Akira Yasuda, "Driving a High-Precision Multi-coils-motor by Reducing an Influence of Manufacturing Variations," DOI:10.17265/1934-8975/2017.01.007, Journal of Energy and Power Engineering 11 (2017) pp. 48-55. (査読有)
- 2) Yuki Hatsude, Go Harumi, Satoshi Saikatsu, Michitaka Yoshino, Akira Yasuda, "Third-Order Mismatch Shaping Technique with Improved Small Amplitude Input Performance for a Digitally Driven Speaker System," International Conference on Analog VLSI Circuits, pp. 49-53, 3-2, Aug., 2016. (査読有)
- 3) Go Harumi, Satoshi Saikatsu, Michitaka Yoshino, Akira Yasuda, "Digital Direct-Driven Speaker Architecture Using Segmented Pulse Shaping Technique," 14th IEEE International NEWCAS Conference, DSP and multimedia, DOI: 10.1109/NEWCAS.2016.7604773, Jun., 2016. (査読有)
- 4) Haruka Matsuo, Yoshiki Motoyama, Akira Yasuda, "Realization of High Precision Multi-Coils-Motor," 2015 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IEEE IFEEC 2015), DOI: 10.1109 / IFEEC.2015.7361457, Nov. 2015. (査読有)
- 5) Yoshiki Motoyama, Haruka Matsuo, Satoshi Saikatsu Akira Yasuda, "Improvement of voltage resolution of a motor driver circuit by a multi-coil drive," 2015 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IEEE IFEEC 2015), DOI: 10.1109 /IFEEC.2015.7361505, Nov. 2015. (査読有)

〔学会発表〕(計 23 件)

- 1) 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", ECT-017-047, ECT-017-028, 3月9日, 2017年, 法政大学(東京都小金井市).
- 2) 松尾 遥, 本山佳樹, 曾我美泰隆, 峯村亮佑, 安田 彰, "相間の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", 電子情報通信学会ソサエティ大会, A-1-17, 9月20~23日, 2016年, 北海道大学(北海道札幌市).
- 3) 本山佳樹, 松尾 遥, 西勝 聡, 安田 彰, "マルチコイルモータを用いた空間ベクトル PDM による高調波電流の低減", 電気学会モータドライブ家電合同研究会, MD-16-040, 3月1日, 2016年, 電気学会会議室(東京都千代田区).
- 4) 松尾 遥, 本山佳樹, 石間 泉, 西勝 聡, 安田 彰, "相互誘導の影響を低減させたマルチコイルモータの提案", 電気学会モータドライブ家電合同研究会, MD-16-042, 3月1日, 2016年, 電気学会会議室(東京都千代田区).
- 5) 松尾 遥, 本山佳樹, 中村智寛, 赤松雄貴, 安田 彰, "マルチコイルモータを用いた回転速度の振動低減法", 電子情報通信学会ソサエティ大会, A-1-8, 9月8日, 2015年, 東北大学(宮城県仙台市).
- 6) 本山佳樹, 松尾 遥, 中村智寛, 安田 彰, "マルチコイルモータのシミュレーションによる電流高調波特性の検討", 電子情報通信学会ソサエティ大会, A-1-9, 9月8日, 2015年, 東北大学(宮城県仙台市).
- 7) 松尾 遥, 本山佳樹, 曾我美泰隆, 西勝 聡, 安田 彰, "マルチコイルモータのモデルに関する一提案", 平成27年電気学会部門大会, GS13-1, 8月28日, 2015年, 長崎大学(長崎県長崎市).
- 8) 松尾 遥, 塩澤 純, 中村 智寛, 本山佳樹, 安田 彰, 吉野理貴, "マルチビット駆動システムを用いたトルクむらの解消", 電子情報通信学会 全国大会, A-1-13, 3月10日, 2015年, 立命館大学(滋賀県草津市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://yasudalab.ws.hosei.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 彰 (YASUDA, Akira)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号: 30339501