

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04437

研究課題名（和文）同期マイナーサンプリング処理によるチューニングレス・モータ制御法

研究課題名（英文）Auto-Tuning Technique for Motor Drives by Synchronous Minor Sampling Method

研究代表者

岩路 善尚（Iwaji, Yoshitaka）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・教授

研究者番号：90604645

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：小型高効率な永久磁石同期電動機に対して、事前に調整作業を行うことなく、結線後にすぐに起動可能となる制御技術を開発し、実験によって検証した。永久磁石同期電動機を回転位置センサレスで起動する際の起動シーケンスを利用して、従来よりも短い電流サンプリング処理を追加することによって、通常起動と同時にパラメータの計測を実行することが可能となり、目標を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脱炭素化社会をめざす中、様々な用途においてエネルギー効率の高い電動機が動力源の中核になっていく必要があり、この電動機を使いこなす制御技術の役割は極めて重要である。また、制御を担うマイクロプロセッサの能力は今もって進化を続けており、この高性能化によって新たな付加価値を引き出せることを実証できた点においても、今後の研究につながる成果であると言える。

研究成果の概要（英文）：We have developed a control technology for small, highly efficient permanent magnet synchronous motors that can be started immediately after wiring without prior adjustment work, and verified it through experiments. This was achieved by using the start-up sequence of a permanent magnet synchronous motor driven without a rotational position sensor, and by executing current sampling at a shorter cycle than conventional control processing, and by executing parameter measurement.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：永久磁石同期電動機 ベクトル制御 センサレス制御 パラメータ同定

1. 研究開始当初の背景

(1) 電動化の推進

地球環境に優しい動力として、世界規模で電動化が推進されている。この動きは自動車だけに留まらず、ドローン、航空機の電動化などにも向けて、国内外で広く研究されている。また、産業分野においても、よりエネルギー消費の少ない、高効率な電動機の採用が広がっている。

これらに適用する電動機としては、「永久磁石電動機（以下、PMモータ (Permanent Magnet Motor) と略)」が最有力な電動機であり、出力密度の向上や、さらなる高効率化をめざして、多くの研究がなされている。

PMモータは、非常に優れた性能を示す一方、その電気特性は千差万別であり、各々のPMモータの特性に合わせた「制御」が必要である。PMモータ本体の性能だけが突出しても、それに制御が対応できなければシステムとして成立しない。PMモータの性能を極めるほど、制御との「合わせ込み作業」が重要になる。

(2) モータ特性の合わせ込み (チューニング) 技術

この「合わせ込み作業」を自動的に行う「オートチューニング機能」が、産業分野の汎用インバータにはすでに搭載されており、電動機の電気定数を自動的に計測することができる。

しかしながら、PMモータは、設計によって極端な非線形特性を示す場合が多い。この非線形特性は、PMモータのメリットでもある「小型化」を追求すればするほど、顕在化する問題である。このため、仮に事前にオートチューニングによって電気定数を取得したところで、PMモータの動作状態によって特性が変化してしまったり、あるいは駆動中に発生する熱によって磁気特性が変化し、電気定数がずれてしまうといった問題が生じる。よって、理想的には実運転中に、運転動作と並行して実行される「オンラインチューニング」が望ましい。これまでも、様々な「同定技術」を導入したオンラインチューニングの報告はあるが、実用レベルでの「チューニングレス」の実現には至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、この事前のチューニング作業を完全になくし、理想的なオンラインチューニングを実現することである。この結果、前述の非線形特性への対応も可能となり、如何なる設計のPMモータに対しても、調整レスのロバスト制御を実現できるようになる。

PMモータの応用システムは多種多様であるが、本研究では産業や家電分野で多く用いられている「位置センサレス制御システム」を対象とする。PMモータを駆動するには、原理的に回転軸の位置角度センサ (パルスエンコーダやレゾルバなど) が必須であるが、それを排除したものが位置センサレス制御であり、ファン、ポンプ、圧縮機などに幅広く用いられている。この位置センサレス制御では、センサの代わりにPMモータの電気定数を用いて、位置の推定演算を行っている。言わば、電気定数の設定値が生命線であり、オンラインによる定数同定を検証するには最も適した対象である。

3. 研究の方法

(1) 従来のモータ制御処理

PMモータの制御は、数 $10 \sim$ 数 $100 \mu s$ の周期 (これを T_s とする (図1)) で制御処理が行われている。この周期 T_s は、PMモータを駆動するインバータのスイッチング周波数に連動しており、この周期をベースに電流制御や位置センサレス制御などが実行されている。

従来型のオンラインチューニング処理 (定数同定処理) も、この周期 T_s で得られた状態量 (電流や電圧、推定速度など) を用いて行われていた。そのため、周期 T_s に対して $5 \sim 10$ 倍程度の時定数で同定値が収束することになる。実際には、何かしらの同定信号 (例えば、ホワイトノイズや、ステップ信号などの過渡現象) を与える必要があり、同定までにはさらに時間を要してしまう。また、同定信号自体が、PMモータの駆動システムとしては余分な信号 (外乱) であり、これも実用化から遠ざかっている要因の一つでもある。

(2) 提案手法

提案する手法は、PMモータの基本制御周期 T_s に対して、それを整数分割した短い演算処理周期 T_{sms} で、定数同定処理を行う (これ

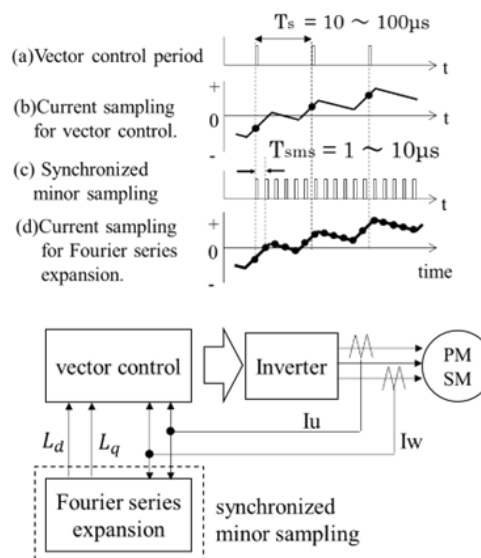


図1 同期マイナーサンプリングを導入したモータドライブシステムの構成

を「同期マイナーサンプリング処理と呼ぶ（以下、「SMS 処理 (Synchronous Miner Sampling 処理)」と略)。この SMS 処理周期 T_{sms} は、従来の処理周期 T_s に対して、 $T_{sms}=T_s/k$ (k は整数) のように設定して、 T_s よりも短い処理周期において PM モータの状態量 (電流や電圧) のサンプリングを行う。より早い周期によって処理を行うことで、PM モータ本来の電流制御などへの影響をなくし、また短時間で電気定数を同定する。例えば、モータの起動時に瞬間的に電気定数を同定して、即座に制御ゲインに反映する。

従来に比べて演算負荷は増加するが、現在のハイエンドクラスのデジタル処理を用いれば、十分に実現可能と考えている。例えば、音声信号処理の分野では、200kHz 近傍でのサンプリングによる信号処理がすでに実現されており、それらの技術を流用して PM モータ制御に数 $\mu s \sim 10 \mu s$ 程度の制御処理を導入する。また、SMS 処理を周期 T_s に同期させること (k を整数とすること) は重要なポイントである。この同期によって、サンプリングに伴うエイリアスを抑え、精度よく状態量を検出することが可能となる。

4. 研究成果

(1) 実験の概要

本研究で開発したチューニングアルゴリズムを、PM モータのセンサレス駆動に適用して実験を行った。実験では、定数が全く未知の 3 つのモータを用いて、接続するだけで定格負荷の駆動が実現できることを確認した。

図 2 は、PM モータのセンサレス駆動における始動時のシーケンスである。センサレス駆動では、回転子位置の情報がないため、初めに停止状態で直流を流して、この直流の電磁力で回転子を移動し、位置合わせを実施する。その後、電流を流したまま加速し、速度がある程度 (約 10%) まで到達したところで、回転位置を推定しながら駆動する「センサレス制御」に切り替える。このセンサレス制御の範囲では、理想的な「ベクトル制御」が実現できるが、回転位置推定のためにモータ定数を必要とする。

本研究では、この起動シーケンスの期間を利用して、制御に必要なモータ定数のすべてをチューニングする。システムのユーザーからは、通常のセンサレス駆動の一連のシーケンスと区別がつかないが、実際には定数チューニングが実施されている。

図 2 に示すように、最初の直流位置決め期間においてモータの巻線抵抗 R_1 を算出し、同時に d 軸インダクタンス L_d を推定する。さらに、回転子位置が定まった状態で、その直交方向の q 軸のインダクタンス L_q も高調波を利用してチューニングする。最後に加速中に、発電定数 K_e を求めて、制御に必要なすべての定数を得ることができる。また、PM モータの極数が不明の場合もあるため、加速時には速度ではなく、誘起電圧を基準にして指令を生成するようにしている。

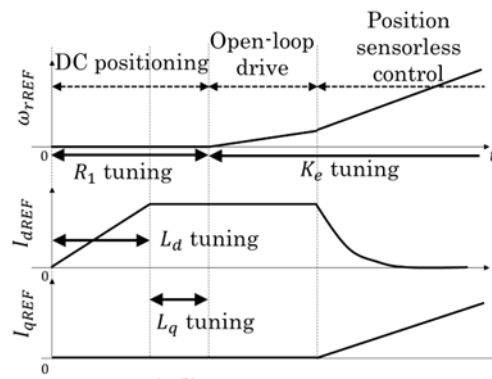


図2 起動シーケンスを利用した定数チューニング

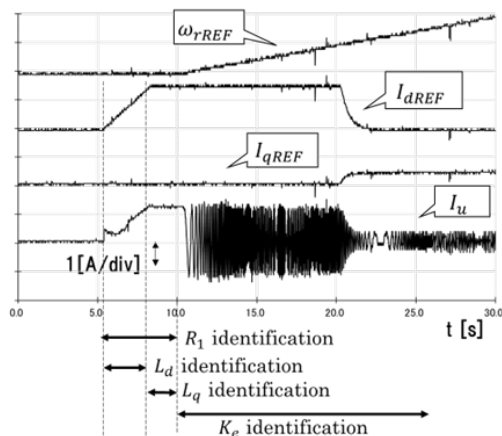


図3 実際の起動時の波形

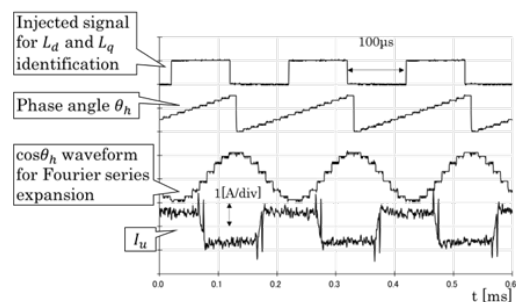


図4 SMS処理の動作確認波形

(2) 実験結果

図3に、実施の起動時の波形を示す。図2に従ったシーケンスで起動を行っている。また、インダクタンス計測中の波形を図4に示す。従来の制御周期（ここでは $100\mu s$ としている）に対して、8分割したSMS処理を追加し、同期マイナーサンプリングによっても求めた高調波電流からインダクタンスを算出している。図4における θh は、SMS処理周期で更新される高調波の位相であり、この位相に基づいて $\cos \theta h$ を電流サンプル値に乘算し、フーリエ積分を実施しインダクタンスを計算している。

図5~7は、3種類のモータを用いて定数をチューニングした例である。それぞれにおいて、センサレス制御に至るまでに、すべての定数の計測が完了していることがわかる。これらは、すべて同じソフトウェアで、事前設定は始動電流の設定のみである（始動電流の値は、モータ銘板記載の値を使用している）。図中に記載した「ノミナル値」は、 R_1 , L_d , L_q に関してはLCRメータで計測した値である。誘起電圧定数 K_e は、モータを空転させて端子電圧から求めた値である。チューニング結果とノミナル値が若干ずれているケースがあるが、このチューニング値によって定格負荷までの駆動が実現でき、また効率も最大点に一致していることから、ここでのチューニング結果は正しいものと判断できる。

以上、通常起動シーケンスを利用した定数チューニング技術を開発し、実験によって、定数未知のモータを駆動できることを確認した。

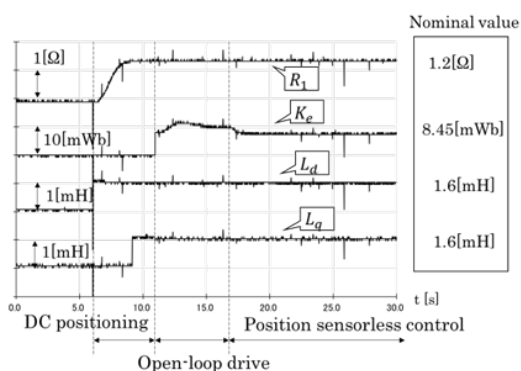


図5 定数チューニング結果（1）
（モータA: 24[V]/0.5[A]/2000[r/min]/10極）

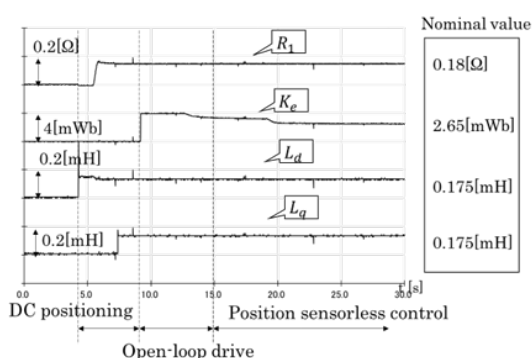


図6 定数チューニング結果（2）
（モータB: 24[V]/2.2[A]/8000[r/min]/8極）

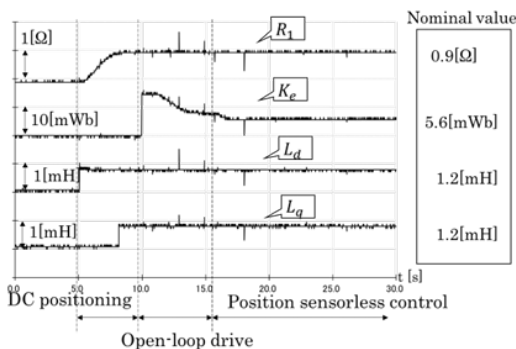


図7 定数チューニング結果（3）
（モータC: 24[V]/1.8[A]/4000[r/min]/8極）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤田智浩
2. 発表標題 同期マイナーサンプリング処理によるチューニングレス・ロバストモータ制御技術
3. 学会等名 (一社)電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田智浩
2. 発表標題 起動シーケンスを利用した永久磁石同期モータの定数同定法
3. 学会等名 (一社)電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------