

複合機向けDCブラシレスモーターの センサーレスベクトル制御

Sensorless Field-Oriented Control of DC Brushless Motor for MFP

橘 優太*
Yuta TACHIBANA

吉川 博之*
Hiroyuki YOSHIKAWA

鈴木 大地**
Daichi SUZUKI

高橋 厚*
Atsushi TAKAHASHI

要旨

コニカミノルタでは、環境負荷低減への要求に応えるため、省エネ技術を搭載した複合機を開発してきている。また、ユーザーの利便性向上を狙いダウンタイム削減につながる寿命予測技術の開発に取り組んでいる。

我々は上記の要求・狙いに応えるための技術として、複合機の電子写真プロセス系並びに用紙搬送系を駆動するDCブラシレスモーター向けに、省エネ化と寿命予測のためのトルク検出を可能にするセンサーレスベクトル制御技術を開発した。

センサーレスベクトル制御技術は、ブラシレスモーターを高効率に駆動できることに加え、モーターの磁石角度を検出するセンサーを削除することで耐熱性・耐環境性を向上できることから、車載を中心に採用が進んできている。

今回の開発ではこのセンサーレスベクトル制御技術を複合機に搭載するための課題であった起動時間の短縮に取り組み、従来のセンサー付き矩形波/正弦波制御と同等レベルの起動時間を達成した。

短い期間で開発を終えるために機能評価、問題点对策、ロバスト性検証に対してシミュレーションを活用してモーターの起動品質を確保した。

開発した制御をコストアップなくかつ短期間で製品搭載できる形態にするために、高位合成を活用してASIC化を行った。

また、寿命予測、故障検知といったダウンタイム削減を行うために必要な負荷トルク検出機能を搭載した。その検出性能はモーター製造のばらつきや温度変化があっても検出誤差を±5%以内に抑える見通しを得た。このトルク検出機能を応用してダウンタイム削減につながる寿命予測技術の開発が今後の課題である。

本稿では上記について紹介する。

Abstract

Konica Minolta has developed MFPs (Multi-Functional Peripherals) equipped with energy saving technique to reduce environmental burden. In addition, we are developing lifetime prediction technique leading to reduction in downtime and improve user convenience.

To achieve the above objects, we have developed a sensorless field-oriented control technique for DC brushless motors that drive an electrophotographic process system and a sheet conveyance system for MFPs, which technique enables torque detection.

Since the sensorless field-oriented control technique can drive a brushless motor highly efficiently without a magnet angle sensor, heat resistance and environment resistance can be improved, so that the control technique has been increasingly adopted mainly on vehicles.

In this development, we have achieved the same start-up time as in the conventional sensed trapezoidal control technique, so that the sensorless field-oriented control technique can be installed in MFPs.

Simulation is used for functional assessment, resolving problems, and robustness verification to achieve the motor start-up quality in a short development time.

The high-level synthesis technique was used to develop an ASIC (Application Specific Integrated Circuit) to be mounted on a product in a short time without increasing cost.

In addition, we installed a load torque detection function necessary for reduction in downtime such as lifetime prediction and fault detection. The detection error can be within ±5% regardless of variations in manufacturing motors and temperature change. Our next technical object is to use this torque detection function to realize a lifetime prediction technique.

* 情報機器開発本部 エンジン制御開発センター 第1エンジン制御開発部

** 情報機器開発本部 オプトメカトロサービス開発部

1 はじめに

従来、複合機においても省エネへの要求は年々高まる一方であり、継続的な取り組みが続けられ、様々な消費電力を低減する技術が搭載されてきている。

また、近年はユーザーの利便性向上を目的とした寿命予測、故障検知といったダウンタイム削減技術への取り組みも盛んになってきている。

コニカミノルタのオフィス向け製品においても、電子写真プロセスや用紙搬送の駆動源として小型モーターが多用されている。これら駆動部品は稼働時間が長くなるに従い摩擦や潤滑剤の枯渇などによって負荷トルクの増加、稼働音の増大などの現象が発生し、機械部品の破損やモーターの異常停止、画像品質への影響といった故障に至ってしまう。これまではこのような状態に至らないような使用量を寿命と設定し、定期的な装置メンテナンスや使用量に応じた部品交換によって対応していた。しかしながら、このような対応によって装置が使えない時間（ダウンタイム）が発生し、ユーザーの利便性を損ねていた。また、寿命は余裕（マージン）を見込んで設定されるため、実力的に寿命レベルの劣化に至っていない部品を強制的に交換してしまう事になり省資源の面でも好ましくない。

さらに、ユーザーによっては想定外の使用方法（厳しいモードを多用する）で運用されることもあり、設定寿命前に故障・交換に至るといった問題もある。これに対して駆動源であるモーターで負荷トルクを検出し、寿命予測によって故障に至る時期を推定し、（ユーザーに迷惑を掛けない）適切なタイミングで交換を行うという方策が検討されてきており、それに必要なトルク検出手段が求められている。

本稿では、上記のより一層の省エネ技術、並びに寿命予測のためのトルク検出手段を提供すると共に、DCブラシレスモーターのコストダウン、省エネ化を可能にしたセンサーレスベクトル制御技術について紹介する。

2 センサーレスベクトル制御技術

今回紹介するセンサーレスベクトル制御は、DCブラシレスモーターの駆動技術であり、ベクトル制御とセンサーレス制御に分けられる。

ベクトル制御とは、DCブラシレスモーターの省エネ駆動技術の一つであり、モーターの駆動電流を回転力に寄与する磁束を発生させる電流成分 (I_q) と、回転力に寄与しない磁束を発生させ熱に変換されて失われる電流成分 (I_d) の2軸に分離して、それらを独立に制御する技術である。 I_q , I_d の2軸で電流を制御することからベクトル制御と呼ばれており、その中でも今回は複合機で使用しているモーターの特性上、常に I_d が0になるようにして、電力を最大限駆動力に変換させる $I_d=0$ 制御を採用している。

センサーレス制御では検出したモーターの電流からローター磁石の角度と回転速度を推定することで、磁石角度（位置）検出センサー、エンコーダ（角度・速度センサー）なしで駆動する技術であり、従来型のモーターよりも安価なシステムを構成することができる。従来のDCブラシレスモーターではコイルに適切な（回転力を発生させる）パターンの電流を流すために、ローター磁石の角度を常に把握するセンサーが必要であった。また、回転速度を一定に保つため、さらにベクトル制御ではローター角度をより高分解能で検出するために追加でエンコーダーを必要としていた。

駆動回路はFig. 1に示す通り、モーターのコイルに流れる電流を検出する。またFig. 2記載したコントローラ内部ではモーターのモデル [モーターコイル抵抗値・インダクタンス、電圧、回路、磁石（磁束）、回転速度、角度、コイル電流の関係を示す数式] により、コントローラが回路に与えている出力をモデルに入力し、その結果得られる電流値を計算する。検出した電流値とモデルにより計算した電流値を比較し、それが一致するようにモデル計算に使用している速度・角度をオブザーバーにより調節していく。その調節が継続的に行われていくと、調節している値が実モーターの速度・角度とほぼ一致するようになり、速度・角度が推定値として得られる。

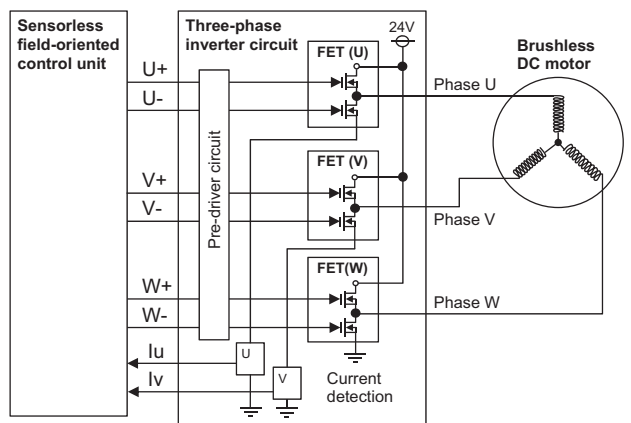


Fig. 1 Sensorless vector (field-oriented) control drive circuit for DC brushless motor.

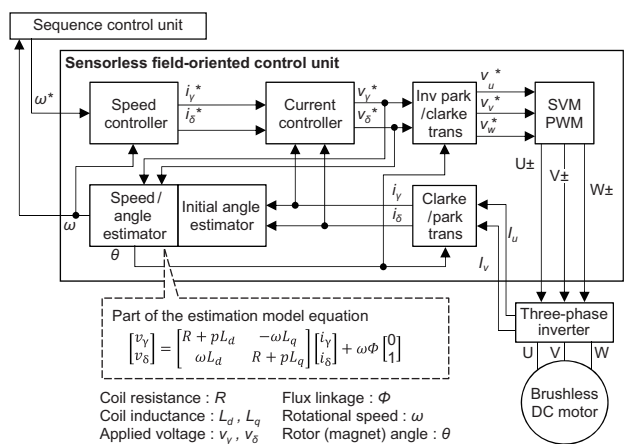


Fig. 2 Block diagram of sensorless vector (field-oriented) control.

3 採用した開発・設計フロー

センサーレス技術の採用によりモーターが安価になることは前述の通りであるが、専用のCPUを新たに設けるといったような制御側のコスト上昇を招くことがないように、開発した制御を既存のASIC (Application Specific Integrated Circuit, 特定用途向け集積回路) に搭載した新たなASICを開発して製品搭載するところまでを今回の技術開発のゴールとしている。これにより製品搭載前にASIC開発ステージを設ける必要があるため、センサーレスベクトル制御の開発期間は実質1年と非常に短期間である。ASIC化できるレベルに作り込みを行うため、

- ・ 複合機向けの要求部分は外部と共同開発
- ・ 駆動品質の確保はシミュレーションを活用し試作回数を減らす
- ・ 実装は高位合成を活用し直接ASIC化する

という方針で開発を行った。

従来のセンサーレスベクトル制御技術に複合機向けの追加要求を満たす機能搭載を行った後、実機（実モーター+実コントローラー）での検証と問題の洗い出しを行い、並行してシミュレーションを行うためプラント（モーター、負荷、駆動回路）モデリングを行いコントローラー（ソース+IFラッパー）モデルに組み込んだ。シミュレーション側では実機検証の問題対策、ばらつき対策（実機試作を1回にするための検証）を実施。Fig. 3に示すように、実機検証とシミュレーションは並行して相互に問題点をフィードバックし、完成度を上げた。さらにソース（Cソース）は高位合成を使用してRTL (Register Transfer Level, レジスタ転送レベルと呼ばれる回路の表現方法) コードに変換後FPGA (Field Programmable Gate Array, 書き換え可能な集積回路) に組み込み、CPU制御との等価性検証を行い、ASIC化用のIP (Intellectual Property Core, 機能モジュール) として仕上げた。

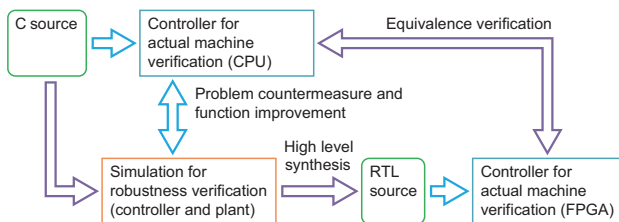


Fig. 3 Controller development process used.

4 複合機に搭載するための課題

従来モーターよりも安価にするために採用したセンサーレス制御を用いたシステムにおいて、従来のDCブラシレスモーターと同等性能とするためにクリアしなければならない課題2点と、コストダウンのポイントとなるASIC化について述べる。

4.1 起動時間の短縮化

センサーレスベクトル制御は、前述したローター角度推定の原理のために、一定速度での定常回転中は安定した角度推定が可能だが、停止しているときはコイルに電流が流れないため（正確には逆起電圧が発生しないため）、ローター角度を推定できない。角度が不明であると起動を行うための通電パターンが決定できないため、起動できない（無理やり起動すると過大な振動が発生するなどの現象により、脱調して起動に失敗する）。よって、従来の手法では、ローターを例えば0度の角度に強制的に引き込む通電制御を行い、ローター角度が0度に整定してから起動するといったことが行われる。しかしながらこの方法では引き込み時に大きな振動や騒音が発生する。さらに振動が収まるまで待つ時間が必要（数百ms）であり、FCOT (First Copy Out Time: コピーボタンを押してから1枚目が排出されるまでの時間) が重要視される複合機では受け入れられない。また逆回転方向に引き込む場合もあり、感光体、転写ベルト等のクリーニングブレード機構を備えた場所では逆回転方向への駆動が許容できない場合もある。そこで、ローターが停止状態でもローター角度を検出できる初期角度推定（初期位置推定）技術を採用している。ローター角度によってモーターの複数のコイルに印加される磁束が変化するため、コイルに電気角を離散的に走査するような電圧パルス印加すると、通電により発生した磁束とローター磁石の磁束の組み合わせに応じて見かけ上のインダクタンスが変動する。この変動はコイルに流れる電流値の変化となって表れるため、印加した電気角によって流れる電流値に差が生じる。この差を検出してローター角度を推定している。ただし、この検出ではコイルに短時間（1ms前後）の電圧パルスを複数回印加するため、流れる電流によって駆動力（トルク）が発生しローターが大きく動いてしまう。

この対策としてFig. 4に示したように、0→180→30→210→の順番で常に180度対向関係にある角度をペアとして印加することで発生したトルクを直後に行う180度対向角度の印加で相殺するようにしている。

また、Fig. 5に示した通り、この方法では発生したトルクによるローターの動き（速度）が図の例では+側に偏るため、ローター角度が微小ではあるが徐々にずれる問題がある。本開発ではこの対策技術としてFig. 6に示すように、0→180→210→30→の順番にし、偶数番目のペアを逆にした印加方法を開発している。これによりFig. 7に示す通りローターの動きは正負が均等になり、同じ角度に留まろうとするためローター角度がずれることを防止している。

以上により、ローター角度推定は脱調を防ぐため、電気角で±60度以内の推定精度を目標とし、電気角12分割で±30度の精度を達成している。この状態にて起動前のローター角度推定に必要な時間を15~20msとし、実際の製品でも採用可能なレベルを実現している。

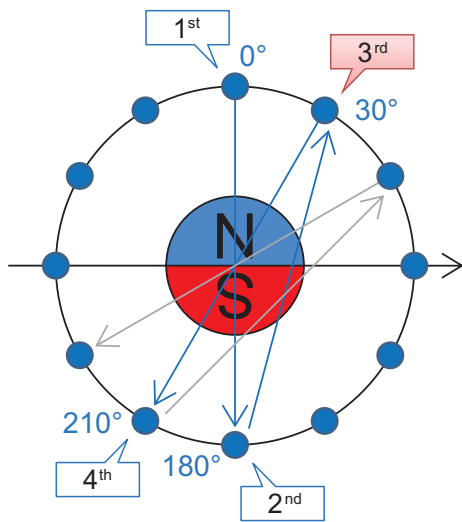


Fig. 4 Basic initial angle estimation energization pattern. The rotor angle is estimated by discrete scanning with a voltage pulse while a generated torque is being cancelled by a voltage pulse applied immediately after at the 180 degrees opposite angle.

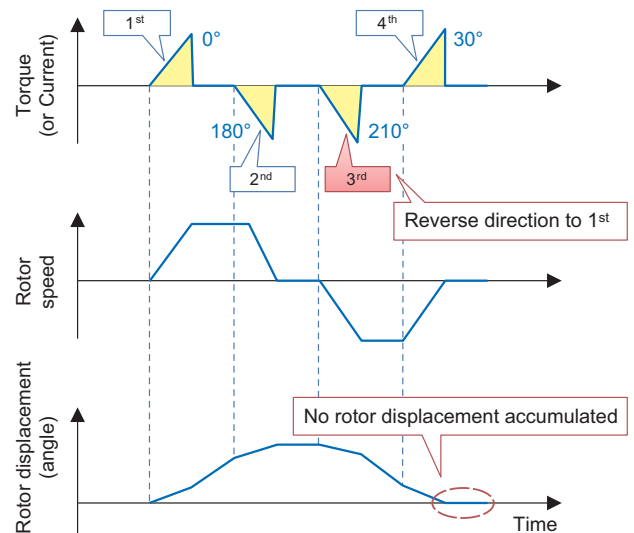


Fig. 7 Rotor displacement while energization is being performed according to initial angle estimation energization pattern with countermeasure for rotor angular displacement. The rotor moves evenly in the positive and negative directions and is likely to stay at the same angle, and the rotor angle is therefore estimated while the displacement of the rotor is being prevented.

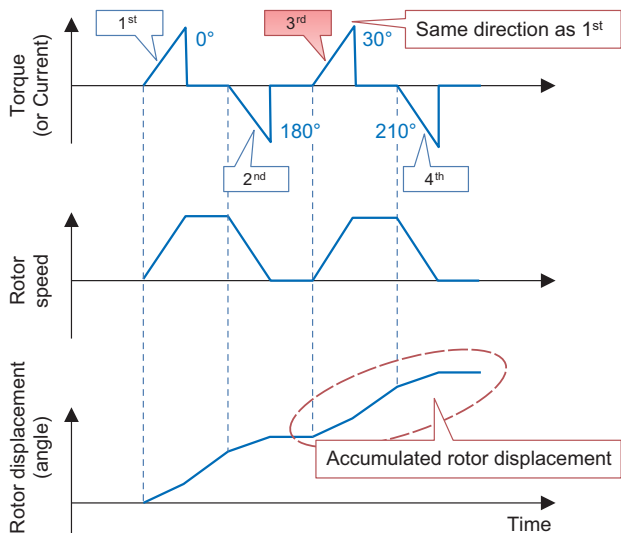


Fig. 5 Rotor displacement while energization is being performed according to initial angle estimation energization pattern.

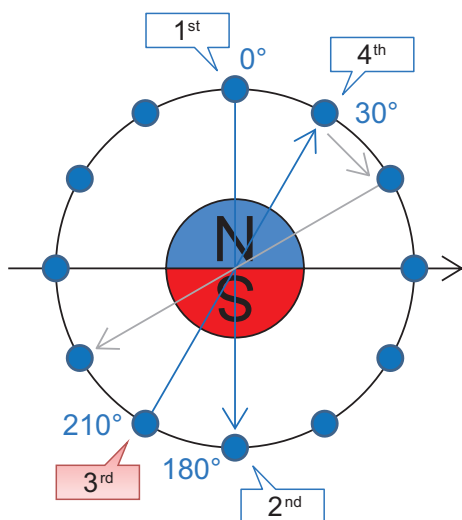


Fig. 6 Initial angle estimation energization pattern with countermeasure for rotor angular displacement.

4.2 ロバスト性の確保（機能性評価）

センサーレスベクトル制御の採用にあたり、前項の通り複合機に対してはFCOTへの悪影響が出ないように、起動時間が従来のDCブラシレスモーター同等であることが求められる。従来モーターは停止中、起動中に関わらず、専用のセンサーによって常に磁石角度を把握できるため、過負荷によるものを除き、基本的には脱調は発生しない。しかしながら、センサーレスベクトル制御では、初期角度推定によって起動前のローター角度を推定して起動したとしても、回転数がある程度（数百rpm）まで上昇するまでは、コイル電流値による角度推定が安定しない。特に今回のように従来のDCブラシレスモーターと同等の時間で起動させる場合は、推定角度が安定する前のずれた状態が引き起こすトルク低下によって脱調が発生しやすくなる。さらにセンサーレスベクトル制御は前述の通り、コントローラ内部でのモデル計算により角度推定を行っているため、使用するパラメータ[コイルの抵抗値とインダクタンス、及び鎖交磁束（磁石の強さ）]が現物のモーターと異なっていると、推定角度のずれがより大きくなってしまふ。現実問題として、N数の少ない検証だけでは脱調しないことを担保できないため、N数を増やした実機検証をするための試作や、規格限界品の試作を数多く行い検証を重ねる必要があり、数種類、複数のサプライヤーのモーター毎にそれをすべて実施することは現実的ではない。そこで、本開発では、推定角度ずれが発生してもトルク低下による脱調が発生しないように、シミュレーションと品質工学を組み合わせた最適条件の探索を行った。Table 1 に脱調に至らないレベルに起動時角度ずれを抑えてロバスト性を確保するために考慮すべきモーター制御におけるばらつき因子を

示す。初期設定状態のパラメーターでは Fig. 8 に示すように起動中に角度ずれが目標としている ±60度の範囲を超え、ばらつき因子の組み合わせによっては脱調が発生し得る状態であったが、パラメーターを調節して最適化を行った結果、Fig. 9 に示すように目標値以内に収まっている。

Table 1 Variation factors in motor control to be consider to ensure robustness while keeping angular deviation at the time of start-up low so that the motor can be prevented from losing synchronism.

Item	Variation factor	
Temperature	Motor temperature	
Motor	Coil impedance	Resistance
		Inductance
Power supply	Flux linkage	
	Voltage	
Wire harness	Resistance	
Drive circuit (MOSFET)	On resistance	Phase U
		Phase V Phase W
	Turn on delay time	High-side
		Low-side
Current detection	Shunt resistance	Phase U
		Phase V
	ADC reference voltage	

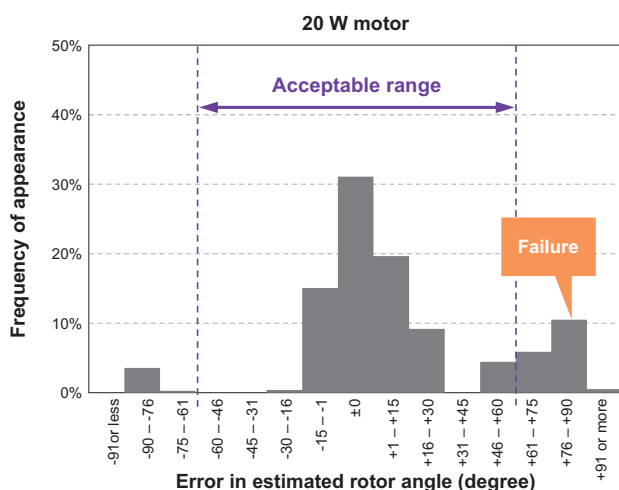


Fig. 8 Error in estimated rotor angle without countermeasure.

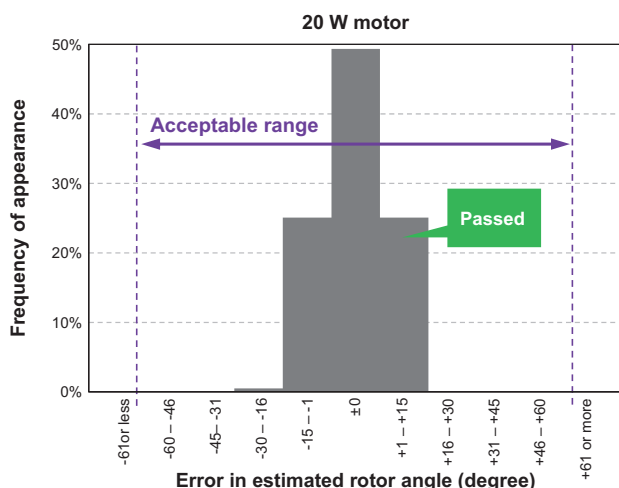


Fig. 9 Error in estimated rotor angle with countermeasure.

4.3 実装設計 (ASIC化)

センサーレスベクトル制御のコア部分は、ソースコードとしてすでに実装レベルの状態にあったため、純粋なモデルベース開発のようにモデルからすべてのソース、もしくはRTLコードを生成する手法が選択できない。当然ながらセンサーレスベクトル制御の演算だけでなく、シーケンス処理、入出力IF、例外処理などを備え既に実装レベルにあること、また固定小数点化されていることもあり、リバースモデリング (エンジニアリング) によって詳細モデルに戻すことは行わず、そのまま検証したソースコードを高位合成ツール (Mentor社製Catapult) によってRTLコード化している。高位合成によってASIC向けRTLコードとFPGA向けRTLコードの等価性が得られるため、ASIC前にFPGAによる実機検証で品質を確保した。モーター制御アルゴリズムを高位合成によってRTLコード化するASIC開発の詳細については別稿に譲り、ここでは割愛する。

5 負荷トルク検出機能

本稿の「はじめに」で述べたとおり、トルク検出手段を提供することも目的としている。従来のDCブラシレスモーターにおいてもモーターを一定速度に保つための制御出力信号によってトルクを推定することは可能ではあったが、モーターパラメーター、電源電圧等のばらつきにより精度は ±20% 程度であった。今回開発したセンサーレスベクトル制御では、その仕組みを活用し、より精度の高いトルク検出機能を実現した。

DCブラシレスモーターをベクトル制御で駆動した場合、制御演算によって抽出される「モーターの駆動電流の中から回転力に寄与する磁束を発生させる電流成分 (I_q)」が数値として得られる。これはそのままモーターの駆動力を制御するためのトルク制御ループ (電流ループ) の被制御対象として使われるが、この値を使って以下の式により出力トルクに変換できる。

$$T = I_q \times \Phi \times n$$

ここで n はモーター磁石の極対数であり使用するモーターの構造によって決まる。 Φ は鎖交磁束 (逆起電圧定数に相当) であり、これもモーターによって決まる定数である。よって I_q が得られれば上記計算で出力トルクが算出できる。しかし、極対数 n はモーターの構造で決まりばらつくことは無いが、 Φ は製造ばらつきで約 ±10% 弱ばらつき、環境温度や駆動中の温度上昇によって -2% +10% 程度変動する。これによりトルクの計算結果もばらついてしまったため補償が必要である。本稿で採用しているセンサーレスベクトル制御では、センサーレス制御の部分でオンライン同定と呼ばれる鎖交磁束のばらつきや温度変化によるずれを補正する制御を搭載している。この制御は鎖交磁束のずれによるローター角度の

推定ずれを補償する目的で搭載しているものであるが、トルク検出制御においてもこの補償制御による補正値を活用するとトルク検出精度を向上させられることが判った。実際に電流値 I_q と共に補正後の鎖交磁束 Φ を ASIC 内のコントロールユニットから取得してトルク算出した結果を Fig. 10 に示す。補正なしに対して補正ありのケースは検出精度が改善し、 $\pm 5\%$ 以内に収まっている。

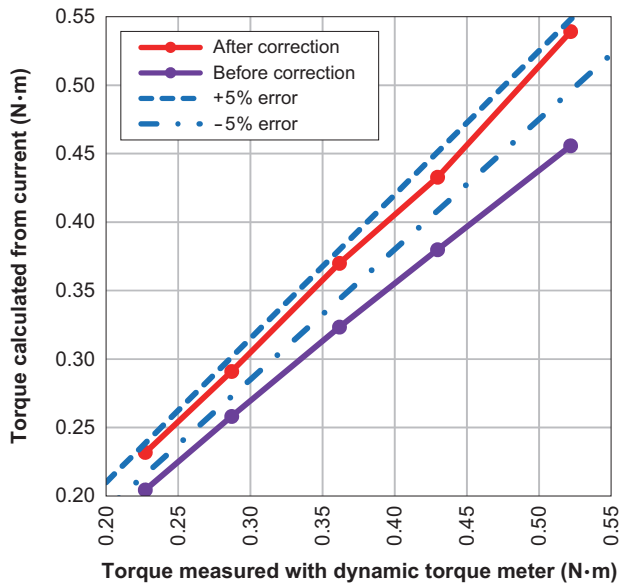


Fig. 10 Accuracy of torque detection.
 Since the corrected interlinkage magnetic flux Φ is obtained from the control unit to calculate the torque, the detection accuracy is improved within the error range of $\pm 5\%$.

6 まとめ

複合機に対して要求の高い省エネ技術、及びユーザーの利便性向上のためのダウンタイム削減技術として、センサーレスベクトル制御で駆動するDCブラシレスモーターを複合機に適用する技術と、トルクを精度良く検出する技術を開発した。

開発した技術はASIC化しており、製品への搭載を進めている。またトルク検出機能を応用してダウンタイム削減につながる技術開発を継続していく予定である。