

## 資料

## スイッチトリラクタンスモータのトルク脈動, 振動, 騒音特性評価

川島 崇宏\*・大峠 忍\*

## 1. 目的

スイッチトリラクタンスモータ（以下SRMと略す）は永久磁石を使用しないため、安価、高温での減磁がない、同じく永久磁石を使用しない誘導機に比べて高効率、始動時に突入電流が生じない、始動トルクが大きいなどのメリットがある。構造が簡単で製造コストが低く、堅牢であり、高速回転に適することから、幅広い分野への適用が期待されるモータである。ただし問題点として、巻線インダクタンスが回転子位置や鉄心の磁化特性に依存することから、電流やトルクの特性的非線形性が強く、トルク脈動、振動、騒音が大きいといったことが挙げられている<sup>1), 2)</sup>。

SRMの駆動制御の方法の一つに電流ヒステリシス制御がある<sup>2), 3)</sup>が、この制御は制御器の設計が容易で応答が速いという長所がある反面、振動や騒音が大きくなるという問題点がある。

本報では、電流ヒステリシス制御によるSRM駆動を行った場合のトルク脈動、振動、騒音についての特性を他の種類のモータと比較した結果を報告する。比較対象のモータは誘導機（以下IMと略す）とブラシレスDCモータ（以下BLDCMと略す）とする。IMは、ロータに永久磁石を用いない点がSRMと共通であるが、正弦波電流を入力して駆動するため回転が滑らかであり、トルク脈動、振動、騒音は小さくなることが予想される。BLDCMは、ロータに永久磁石を用いるためSRMよりも高効率になる可能性が高いモータであるが、SRMと同様に矩形波状の電流を入力して駆動することからトルク脈動、振動、騒音は比較的大きくなると予想される。

## 2. 方法

## 2.1 SRMの構造と回転制御方法

SRMの構造の一例として三相機に使われるステータ6極、ロータ4極（以下6/4構造と略す）のものの断面図を図1に示す。SRMはステータとロータの両方に突極構造を持ち、巻線はステータの各突極に集中巻で巻かれる。巻線に電流が流れると巻線の巻かれたステータ突極が磁化し、そ

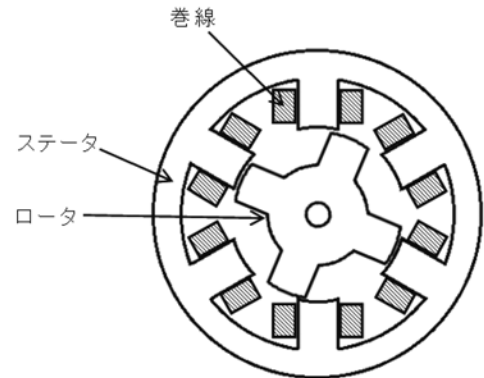


図1 6/4構造SRM断面図

のステータ突極に生じる磁場によって近くにあるロータ突極が磁化されて引き合うことでトルクが発生し、回転する。磁化させるステータを適切に切り替えていくことで回転が持続させられるが、そのためにはロータ位置の把握が必要であり、安価なホールセンサを用いてロータ位置を検出する方法が実用的な位置検出の手段として用いられる<sup>3)</sup>。

磁化されるステータ突極に巻かれている巻線の励磁は、駆動回路により電圧を加えることによって行われ、そのときの巻線電流の制御はヒステリシス制御をベースに行われる<sup>3)</sup>。図2にSRM駆動回路の構成を示す。駆動回路は正電圧モード、ゼロ電圧モード、負電圧モードの3つを切り換えて電流を増減させ、電流を指令値に近づけることで電流制御を行う<sup>3)</sup>。

## 2.2 測定システム

## 2.2.1 システム構成

図3にモータ特性評価に用いる測定システムの構成を示す。供試モータと同軸上にモータに負荷をかけるためのIM（富士電機MVK-8107A）を接続し、それらの間にトルクと回転速度の測定のためにロータリエンコーダ付きトルクセンサ（ユニパルスUTMII-10Nm(R)）を設置した。それぞれのモータは簡易光学実験台（駿河精機J15-1206T）上にボルトで固定した。図4に供試モータとしてSRMを設置した場合の測定システムの写真を示す。右側がSRM、左側が負荷発生用IMである。

供試モータはSRM（明和製作所SRM-LL10T-6）、IM（富士電機MVK-8095A）、BLDCM（フーシンFBLM86-660）

\*次世代パワーエレクトロニクス技術開発プロジェクトチーム（現:電子・電気技術科）

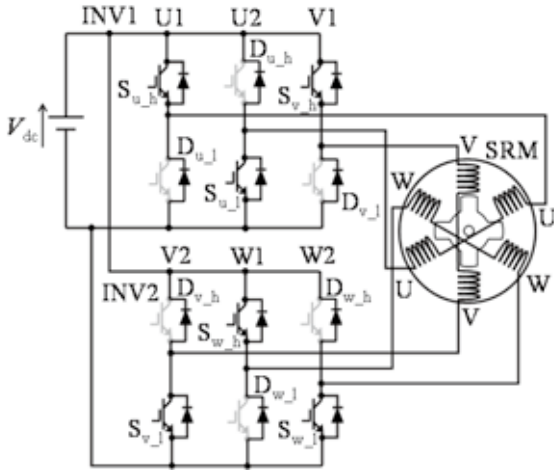


図2 SRM駆動回路構成

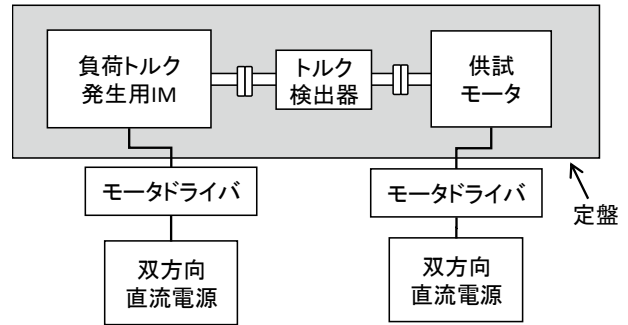


図3 モータ特性評価試験システム構成

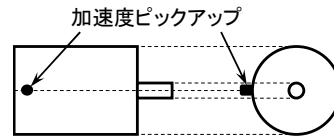


図5 加速度ピックアップ取り付け位置

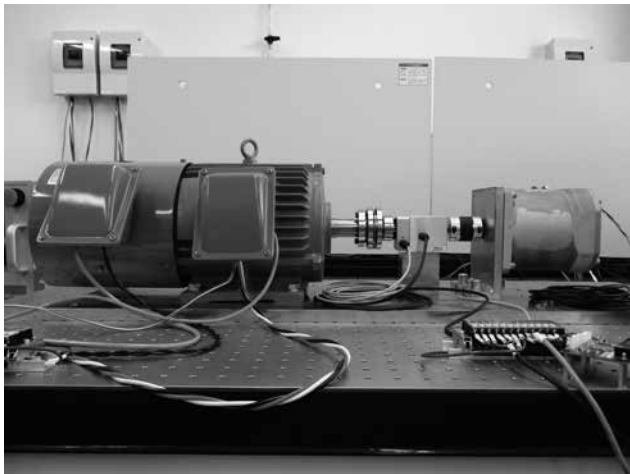


図4 SRM評価時の試験システム写真

表1 各供試モータの仕様

供試モータ	SRM	IM	BLDCM
電源電圧 (ドライバ入力)	DC 200 V	DC 320 V	DC 48 V
定格出力	520 W	750 W	660 W
定格回転速度	3800 rpm	3600 rpm	3000 rpm

の3つとした。表1にそれぞれのモータの仕様を示す。それぞれ汎用品の中から可能な限り定格出力と定格回転速度が同程度のものを選定した。それぞれのモータドライバへ入力する電源は直流とし、減速時の電力回生を考慮して双方向直流電源装置 (MywayプラスMWBFP2-1040) を用いた。

SRMのモータドライバには、デジタル制御システム (MywayプラスPE-Expert3) とインバータユニット (MywayプラスMWINV-5R022) 2台を組み合わせたシステムを使用し、2.1で示した電流ヒステリシス制御を実装した。IMのドライバには汎用インバータ (富士電機FRN0.75G1S-2J)，BLDCMのドライバには付属ドライバ (フーシンBLD4820) を用いた。負荷発生用IMのドライバには汎用インバータ (富士電機FRN2.2VG1S-2J) を用いた。

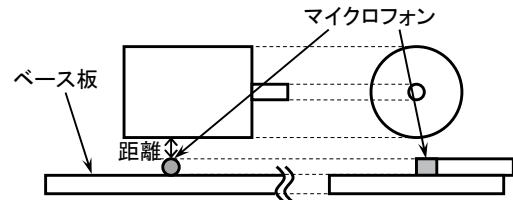


図6 マイクロフォンの位置

表2 トルク脈動測定時駆動条件

項目	設定条件
回転速度	100 rpm
回転方向	正転
負荷トルク	0.85 Nm

表3 振動・騒音測定時駆動条件

項目	設定条件
回転速度	0~3000 rpm
回転方向	逆転
負荷トルク	無負荷及び 0.7 Nm (3000 rpm時)

### 2.2.2 振動及び騒音測定

振動及び騒音の測定には、ブリュエル・ケアー製音響/振動計測プラットフォームPULSE (データ収集用フロントエンド:3560-C, アンプ:2178992, 加速度ピックアップ: Type 4393, マイクロフォン: Type 4190) を用いた。

振動測定時の加速度ピックアップの取り付け位置は各モータとも図5に示す位置とした。加速度ピックアップはモータ筐体側面にワックスで付着させ、テープで補助して固定した。

騒音の音圧測定時のマイクロフォンの配置を図6に示す。音圧の測定はモータの直下にて行い、各供試モータ

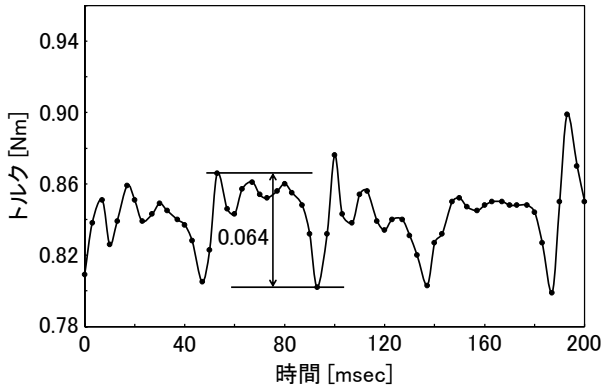


図7 SRMのトルク脈動波形

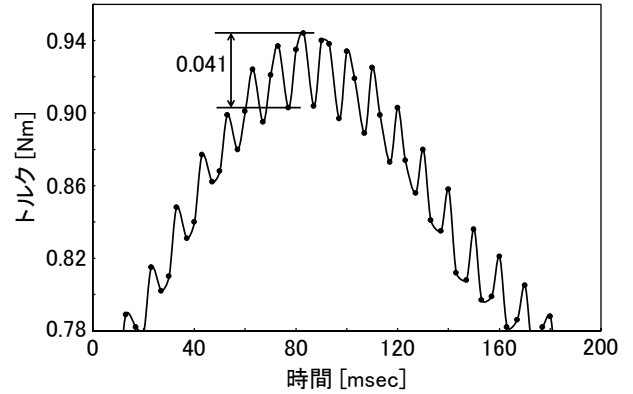


図8 IMのトルク脈動波形

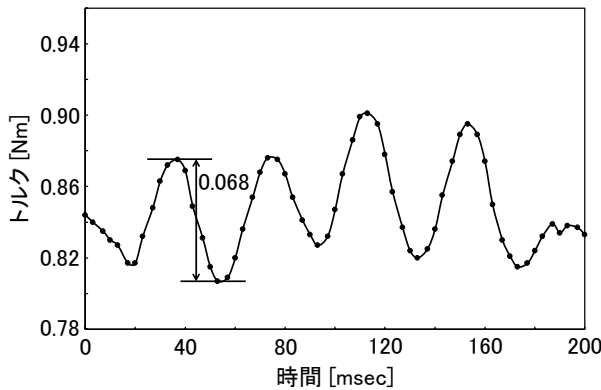


図9 BLDCMのトルク脈動波形

とマイクロフォンの距離はSRMが25.1mm, IMが2.5mm, BLDCMが44.1mmであった。また、騒音の測定では、人間の聴覚に対する影響を評価するために、マイクロフォンで測定された音圧を人間の聴覚の特性を反映したA特性の周波数重み付けで補正したA特性音圧レベルを用いた。A特性音圧レベルへの補正は音響/振動計測プラットフォームの機能を用いて行った。

### 2.2.3 モータ駆動条件

表2にトルク脈動測定時の各供試モータの駆動条件を、表3に振動及び騒音測定時の駆動条件を示す。測定は各種モータを速度制御で回転させ、負荷発生用IMで負荷トルクを加えることで行った。トルク脈動測定時の回転速度については、トルク脈動は回転速度が低いときに顕著に表れることや、トルク検出器のサンプリング速度(約3msec)でトルク脈動が観測可能かどうかを考慮して、定格回転速度よりも大幅に低い100rpmとした。回転方向については、100rpmで逆転させるとBLDCMの速度制御が不安定になったため正転とした。負荷トルクは、現状の制御器を用いてSRMが出せる最大の値とした。

振動及び騒音の測定時の回転速度は、各供試モータのモータドライバの速度指令値のつまみを手で回すことで、0~3000rpmまで徐々に増やす方法をとった。回転方向については、正転ではSRMの回転速度が3000rpmまで上昇し

なかったため逆転とした。負荷トルクは、無負荷(負荷発生用IMを駆動しない状態)の場合、回転速度3000rpmのときに0.7Nmが発生するように負荷発生用IMのトルク指令を設定した場合の2つの条件で測定を行った。なお、0.7NmはSRMを現状の制御器を用いて逆転方向、回転速度3000rpmで駆動させているときに出せる最大のトルク値である。

## 3. 結果

### 3.1 トルク脈動特性

図7, 8, 9に表2の条件で駆動したSRM, IM, BLDCMそれぞれのトルク測定値の時間波形を示す。測定条件の回転速度100rpmは今回評価に用いたモータの定格回転速度3000rpmに比べてかなり低速であったため、速度制御があまり安定していなかった。そのため、モータの駆動特性に起因して生じていると思われる周期の短いトルク脈動よりも長い周期でトルクと回転速度が変動した(特にIMにおいて変動が大きかった)。図7~9は、その長周期で変動する波形の平均値が0.85Nmになっているときの波形の一部である。今回測定するトルク脈動は速度制御に起因するとみられる長周期のトルク変動とは異なるため、それらは切り離して考える。なお、それぞれの図中に、モータの駆動特性起因と思われる短周期のトルク脈動のP-P値(Peak to peak値)の代表値(測定値の最頻値に近い値)を数字で示してある。

図7~9の波形から測定したトルク脈動のP-P値より、今回の測定条件・駆動制御システム環境でのSRMのトルク脈動は正弦波駆動モータであるIMよりは大きく、同じ矩形波駆動モータであるBLDCMとは同程度であることが分かった。

今回の測定では、測定条件の回転速度100rpmの際に各供試モータのモータドライバの速度制御の安定性が悪く、それに起因するものと思われる長周期のトルク変動が生じた。これは目的とするトルク脈動の測定にも影響していると考えられるため、厳密な評価をするためには改善の必要

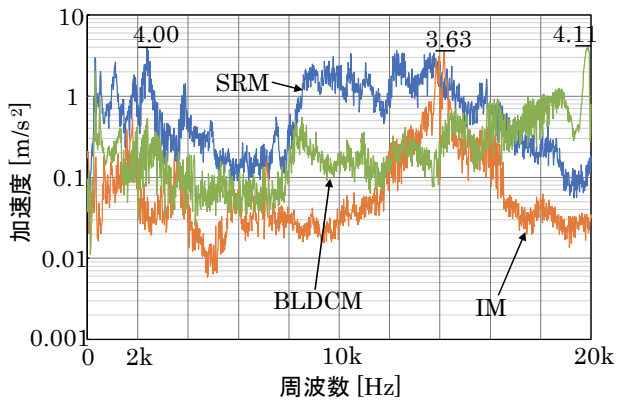


図10 無負荷時の各供試モータの振動加速度測定結果の周波数特性

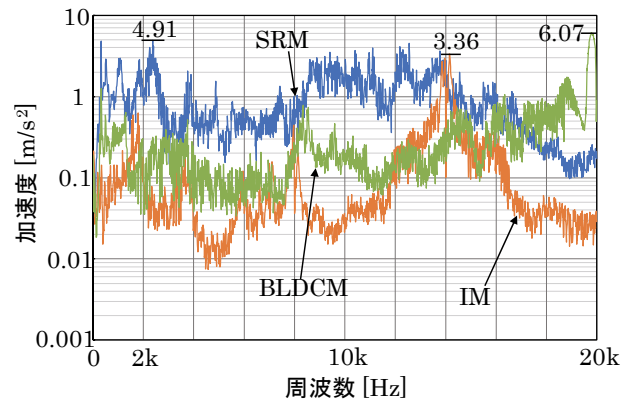


図11 負荷トルク0.7 Nm (3000 rpm時) 条件時の各供試モータの振動加速度測定結果の周波数特性

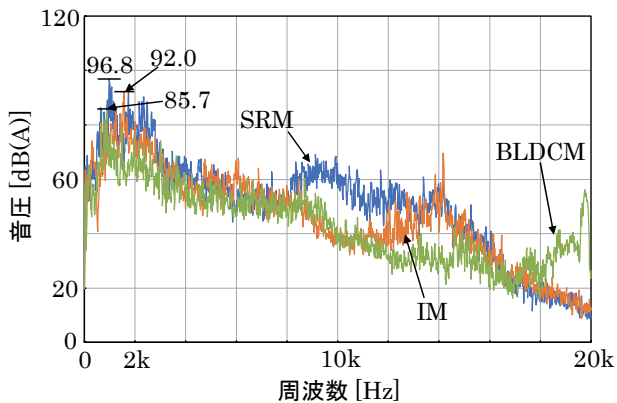


図12 無負荷時の各供試モータのA特性音圧レベル測定結果の周波数特性

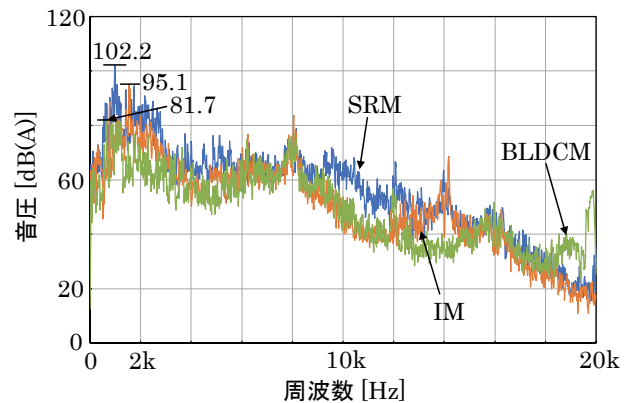


図13 負荷トルク0.7 Nm (3000 rpm時) 条件時の各供試モータのA特性音圧レベル測定結果の周波数特性

があると考えられる。

### 3.2 振動特性

図10に、無負荷の条件で回転速度を0~3000rpmまで変化させた際に測定された各供試モータの振動加速度の0~20kHzの周波数範囲のスペクトルについて、回転速度が0rpmから3000rpmに達するまでの期間中の各周波数における最大値をプロットしたグラフを、図11に回転速度3000rpmのときに0.7Nmの負荷トルクとなる条件で同様に回転速度を変化させた際の同特性のグラフを示す。縦軸は対数軸としている。なお、図10、11には測定周波数範囲における各モータの振動加速度スペクトルの最大値が数字で示してある。

SRMは広い周波数において振動が大きく、他のモータに比べて3kHz以下の低周波帯にある振動成分が大きいことが分かる。この周波数帯の振動成分は、回転周波数とその高調波に関わる振動成分であると考えられる。その他のモータはモータドライバのスイッチング周波数に関わる成分(IMは14kHz、BLDCMは20kHz)が顕著で、それ以外の振動成分のスペクトルは比較的小さい。SRMは電流ヒ

ステリシス制御を行っているため、負荷電流の大きさが変わるとモータドライバのスイッチング周波数が変わる特性があり、スイッチング周波数によるものと思われる8k~14kHz付近の高周波側の振動成分が回転速度の変化に応じて幅広い範囲に渡って大きくなる。このことから、図10と図11のSRMの高周波側の振動成分が広い周波数範囲で大きい値となっている。IMは正弦波駆動のため、モータドライバのスイッチング周波数起因と思われる14kHz付近以外の振動成分は他のモータと比べてかなり小さい。BLDCMは矩形波駆動であることから、IMに比較すると振動が大きく、モータドライバのスイッチング周波数と思われる20kHz付近の成分以外の周波数にも大きめのスペクトルがある。また、モータドライバのスイッチング周波数起因と思われる振動成分のスペクトル測定値は他のモータよりもかなり大きい。その周波数は使用した加速度ピックアップの帯域16.5kHzを超えており、加速度ピックアップの感度が低下する領域のため、実際のスペクトルはさらに大きい可能性がある。

今回の振動測定の結果では、IMとBLDCMはモータドラ

イバのスイッチング周波数起因の振動成分が最大となったが、SRMだけはモータドライバのスイッチング周波数ではない、より低周波の成分の振動が最大となった。また、SRMは回転速度の変化に伴って広い周波数範囲で大きな振動を生じる特性があることが分かった。このことはモータを適用するアプリケーションによって様々な問題を生じる可能性があるため、改善が望まれるところである。

### 3.3 騒音特性

図12に、無負荷の条件で回転速度を0~3000rpmまで変化させた際の各供試モータのA特性音圧レベル測定結果の0~20kHzの周波数範囲のスペクトルについて、回転速度が0rpmから3000rpmに達するまでの期間中の各周波数における最大値をプロットしたグラフを、図13に回転速度3000rpmのときに0.7Nmの負荷トルクとなる条件で同様に回転速度を変化させた際の同特性のグラフを示す。なお、図12、13には測定周波数範囲における各モータの騒音の音圧レベルスペクトルの最大値が数字で示してある。

図12及び図13の結果のスペクトルは、マイクロフォンで測定した音圧にA特性の重みづけをしているため低周波側が大きく、どのモータにおいても1k~3kHz付近の成分が最も大きくなった。1k~3kHz辺りのスペクトルが大きくなった原因には、周囲環境の音、特に電源装置の冷却ファンの稼働音も影響しているものと考えられる。SRMでは、回転速度の変化に応じてモータドライバのスイッチング周波数が変わるため、振動と同様に8k~14kHzにわたる範囲の高周波側の成分が他のモータと比較して大きくなった。IMとBLDCMでは、振動特性と同様にモータドライバのスイッチング周波数のところでスペクトルが大き

くなったが、周波数が高い部分は重みが小さいため、全体から見ると値は小さいものとなった。スペクトルの最大値はSRMが最も大きく、次いでIM、BLDCMとなっており、IMとBLDCMの値の大小関係が振動の測定結果とは異なるものとなった。これは、IMとマイクロフォンとの距離が2.5mmと非常に近かったのに対して、BLDCMは44.1mmと離れていたことが原因として考えられる。スペクトルが最大値を記録した周波数はどのモータも1kHz近辺であった。また、全体的に見て、騒音のスペクトルは振動に比べると供試モータ間での差は小さかった。

以上の騒音測定の結果から、SRMは回転速度の変化に伴って広い周波数範囲で騒音が大きくなる特性があることが分かった。その点は騒音対策を難しくする要因になりえるため、改善が望まれるところである。

本報で報告した騒音測定では周囲環境音が排除されていなかったことから、測定結果にその影響が無視できないレベルで表れた。また、各供試モータとマイクロフォンの距離がそれぞれ異なっており、その差も測定に影響したものと考えられる。十分な評価をしていくためには測定環境とマイクロフォンの配置を見直す必要があると考えられる。

## 文 献

- 1) 内藤治夫. スイッチトリラクタンスモータの課題と対策. 電気学会誌. 2008, vol.128, no.4, p.227-230.
- 2) 石川裕記, 鎌田義信, 内藤治夫. スイッチトリラクタンスモータの瞬時トルクを一定にする電流波形とその波形成形制御法. 電気学会論文誌D. 2005, vol.125, no.12, p.1113-1121.
- 3) 川島崇宏, 大峠忍. スイッチトリラクタンスモータの駆動制御技術開発. 島根県産業技術センター研究報告. 2017, no.53, p.7-12.