

資 料

スイッチトリラクタンスモータの駆動制御技術開発

川島 崇宏*・大峠 忍*

1. 目 的

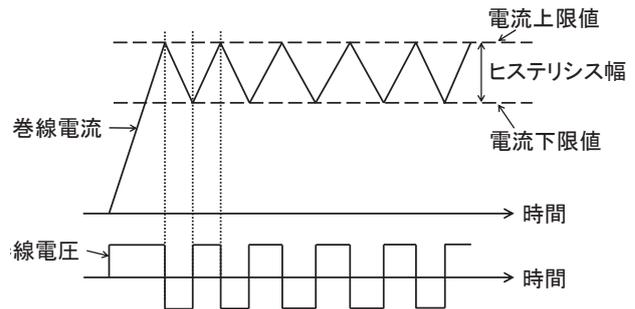
スイッチトリラクタンスモータ（以下SRMと略す）は永久磁石を使用しないため、安価、高温での減磁がない、希土類資源の供給量や価格変動による影響を受けないといった長所を持つ。また、回転子に巻線がないことから、同じく永久磁石を使用しないモータで産業用を中心に広く用いられている誘導電動機に比較して高効率、始動時に突入電流が生じない、始動トルクが大きいなどのメリットがある。構造が簡単で製造コストが低く、堅牢であり、高速回転に適することから、幅広い分野への適用が期待されるモータである。ただし問題点として、巻線インダクタンスが回転子位置や鉄心の磁化特性に依存することから、電流やトルクの特性の非線形性が強く、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¹⁾。これらの問題を電流波形形成制御によって解決する方法が提案されている^{2), 3)}。

このSRMの駆動に必要な巻線電流制御の方法には、電流ヒステリシス制御を用いるものとパルス幅変調制御を用いるものがある。図1にそれぞれの制御方法の模式図を示す。

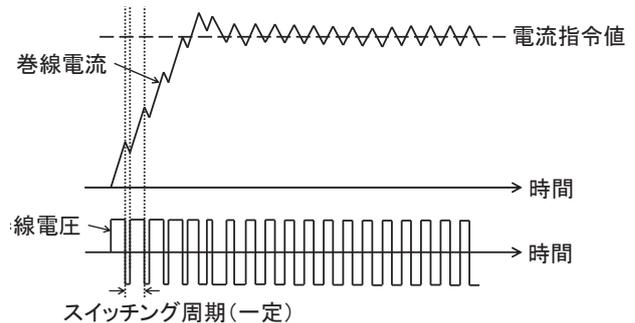
電流ヒステリシス制御は、電流の上限値と下限値を設定し、電流増加中に上限に達したら電流を減少させ、電流減少中に下限に達したら増加に切り替えることで、ある一定の幅（ヒステリシス幅と呼称される）の間で電流の増減を繰り返させる制御法である。この制御は制御器の設計が容易で応答が速いという長所があるが、SRMの巻線インダクタンスの非線形性によって電流波形の傾きが変わるとスイッチング周波数が変化するため、モータの固有振動数とスイッチング周波数が一致した際に振動や騒音が大きくなるという問題が発生することがある。

パルス幅変調制御はスイッチング周期を固定し、一周期のスイッチングの中でのON期間とOFF期間の比率を変えることで電流を増減させる制御法である。この制御では、一定のスイッチング周波数で制御を行うため、スイッチング周波数とモータの固有振動数の一致を防ぐことができ、振動・騒音の増大を防止できる。欠点として、制御

*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



(a) 電流ヒステリシス制御



(b) パルス幅変調制御

図1 SRM 駆動方法模式図

器の安定化設計が必要であることや、常に可聴域上限以上の周波数でスイッチングを行うことが一般的であるため駆動回路のスイッチング損失が大きくなるといったことが挙げられる。

また、SRMを駆動するためにはロータ位置を把握して適切な巻線に電流を流す必要がある。ロータ位置の検出には位置センサを用いる方法と、電流波形などその他の情報から推定する方法がある。位置センサを使用する場合はその分のコストアップが問題となり、ロータ位置を推定する場合は制御器のコストアップと開発期間の長期化が問題となる。

本報では、低コストかつ短期開発が可能なSRM駆動制御システムの開発を目的として、安価なホールセンサ式ロータ位置検出を用いた電流ヒステリシス制御による駆動方法について検討した結果を報告する。

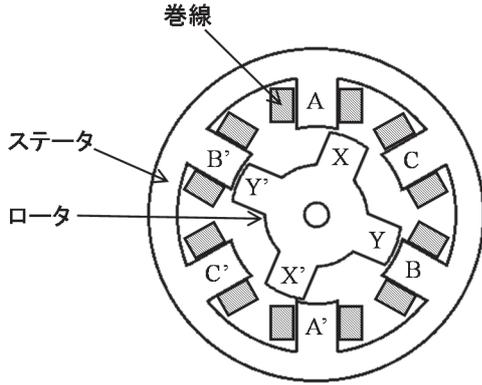


図2 6/4構造SRM断面図

2. 方法

2.1 SRMの構造と回転方法

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2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。

SRMは電流の流れたステータ突極と、その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。図3に巻線に電流を流した際のSRMの回転の様子を示す。ロータ位置が図3(a)の状態のSRMに反時計方向に回転するトルクを発生させるにはa1端子からa2端子へ向けて電流を流す。するとステータのA突極とA'突極が磁化され、そこに生じた磁束によってそれぞれの最も近くにあるロータ突極、X突極とX'突極が磁化されてステータ突極へ引き寄せられることで、ロータには反時計方向へのトルク T が生じる。ロータ位置が図3(a)の位置から反時計方向に回転して図3(b)の位置へ変わった場合には、電流を流す巻線をa1端子→a2端子からc1端子→c2端子へ切り替える。c1端子からc2端子へ電流を流すと、ステータのC突極とC'突極が磁化され、ロータのY突極とY'突極がステータ突極へ引き寄せられてロータに反時計方向へのトルクを生じさせることができる。

SRMの回転を持続させるためには、ロータ位置に応じて所望の回転方向へのトルクを発生させるのに適切なステータ突極を磁化する必要がある。そのためにはロータの現在位置を検出することが必要となる。

ロータ位置の検出を安価に実現する方法としてホールセンサを用いる方法がある。ホールセンサは磁場を検出するセンサで、ロータ軸上に取り付けられた位置検出用磁石の磁極を検出することでロータの位置を把握することができる。

図4に実証に用いた市販SRM（明和製作所SRM-LL10T-6）の構造とロータ位置検出用ホールセンサの配置仕様を示す。ホールセンサはU、V、W各相の巻線の巻かれたステータ突極の位置に対応して配置されている。ロー

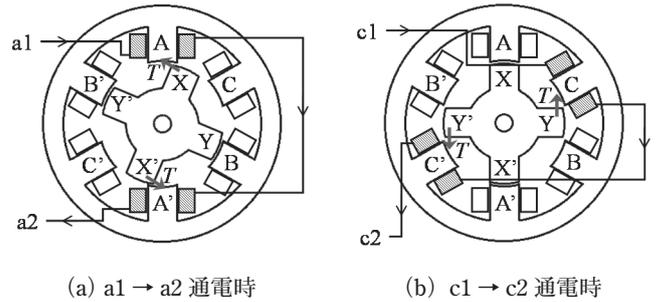


図3 SRMの回転

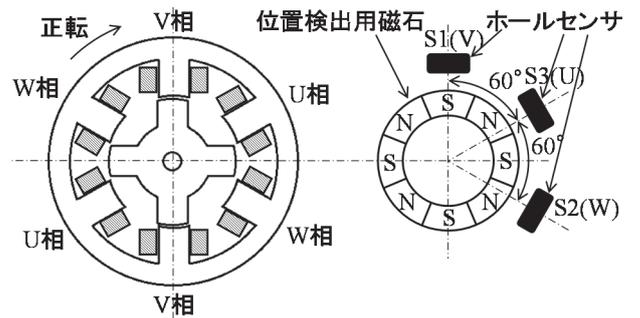


図4 SRM-LL10T-6の構造とホールセンサ配置

タ位置検出用磁石は、S極がロータ突極の位置に対応するように設置されている。これにより、ホールセンサがS極を検出している時には、ホールセンサに対応する相のステータ突極にロータ突極が接近していることを検出することができる。このロータ位置情報を基に、所望の回転方向のトルクを発生させるために磁化が必要なステータ突極の相を判別し、その相の巻線に電流を流すように制御することでモータを回転させる。

2.2 電流制御方法

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う。以下、励磁される巻線の相を励磁相と称する。

図5にSRM駆動回路の構成を示す。SRM駆動回路は、一般的なモータ駆動に用いられる汎用三相インバータとは構成が異なるため、汎用三相インバータのスイッチの半分を常時オフの状態にして、2台を並列に接続することで実現している。

巻線電流の制御はヒステリシス制御をベースにして行う。一般にはヒステリシス幅を固定とする方法がとられるが、その場合はロータ回転に伴う巻線インダクタンス変化によってスイッチング周波数が大きく変化することが考えられる。そのため、本報で報告する制御方法では、スイッチング周波数の大幅な変化を緩和する措置を導入する。

図6にU相のみ抜粋した駆動回路の動作モードを示す。動作モードには正電圧モード、ゼロ電圧モード、負電圧

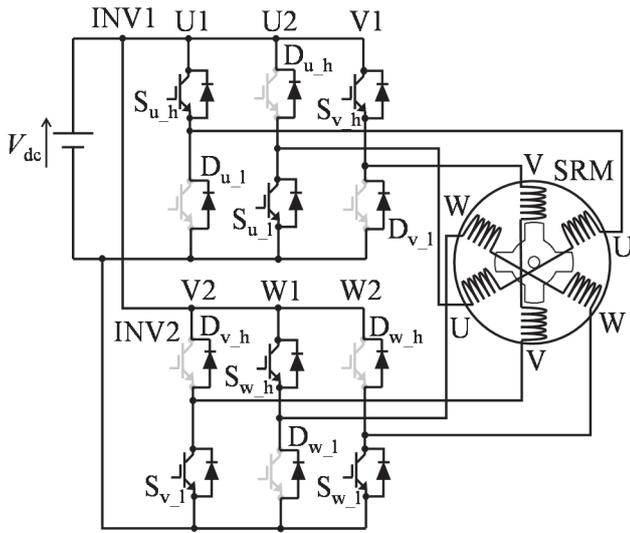


図5 駆動回路構成

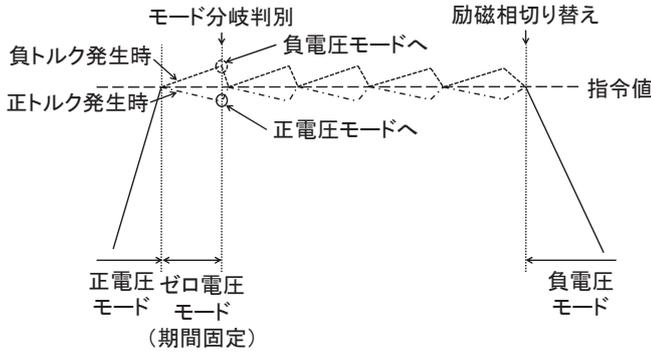
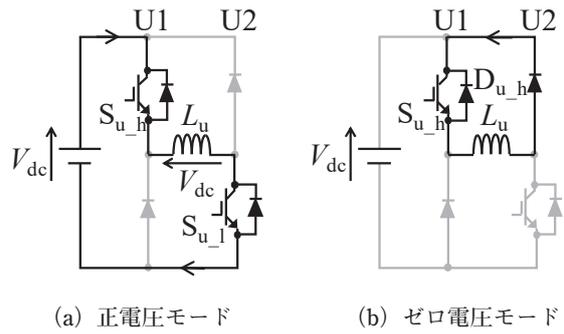


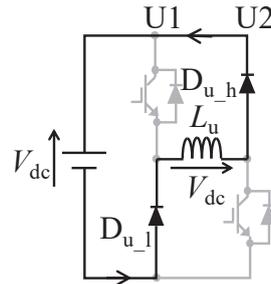
図7 電流制御時の巻線電流波形の挙動

モードの3つがある。正電圧モードでは励磁相のスイッチを両方ともオンにする。そのとき巻線には電流が増加する向きに電圧が加わる。ゼロ電圧モードではスイッチ $S_{u,h}$ をオン、スイッチ $S_{u,l}$ をオフにする。その際は巻線にほとんど電圧は加わらず、電流がスイッチとダイオードを通過して還流している状態となる。このときの巻線電流の増減はロータの挙動によって異なる。負電圧モードではスイッチを両方ともオフにする。巻線に電流が流れていた場合は2つのダイオードを通過して電源へ逆流する。そのとき巻線には電流が減少する向きに電圧が加わる。巻線電流がゼロになると、それ以降はダイオードでせき止められて電流は流れない。巻線電流の制御は、この3つのモードを切り替えて電流を増減させ、電流を指令値に近づけることで行う。

励磁相がU相の場合について、電流制御時の巻線電流の挙動は以下のとおりである。その他の相が励磁相であっても動作は同様である。図7にSRM駆動制御時の励磁相の電流の挙動を示す。励磁相がU相に切り替わると、まず駆動回路を正電圧モードにして巻線電流を増加させる。電流が指令値に達するとスイッチ $S_{u,l}$ をオフにしてゼロ電



(a) 正電圧モード (b) ゼロ電圧モード



(c) 負電圧モード

図6 駆動回路の動作モード

圧モードへ切り替える。このモードのときに回転方向に対して正方向にトルクを発生させている場合は、ロータが励磁相の突極に近づいているため透磁率が上がり、巻線インダクタンス L が増加する。(1)式に示すファラデーの法則より、巻線にほとんど電圧 V が加わっていないときの巻線内の磁束 Φ はほぼ一定である。ここで N は巻線巻数、 t は時間である。磁束 Φ と巻線電流 I の間には (2) 式の関係があることから、 L が増加すると巻線電流は減少する。

$$V = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Phi = \frac{1}{N} \cdot L \cdot I \dots\dots\dots (2)$$

逆に回転方向に対して負方向のトルクを発生させている場合は、ロータが励磁相の突極から遠ざかるため巻線インダクタンス L は減少し、巻線電流は増加する。

ゼロ電圧モードの期間は固定とした。これにより、スイッチング周波数の変化をある程度緩和できる。

ゼロ電圧モードの期間が終了した後は、現在の電流値と指令値を比較し、電流値が指令値よりも小さければ正電圧モードへ切り替えて電流を増加、指令値より大きければ負電圧モードへ切り替えて電流を減少させる。

その後は、電流値が指令値と一致したら一定期間ゼロ電圧モードへ切り替えて、同様の処理を励磁相が切り替わるまで繰り返す。励磁相が他の相へ切り替わったら負電圧モードへ切り替えて巻線電流をゼロまで減少させる。

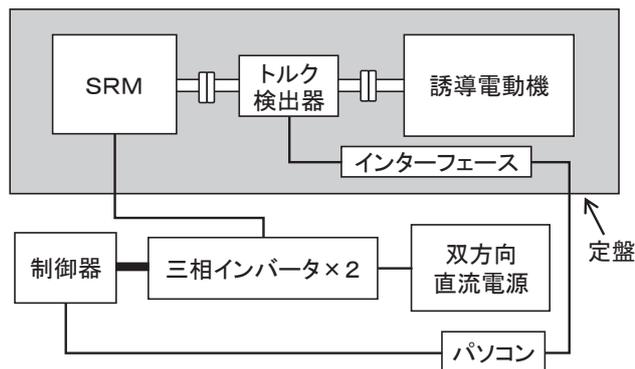


図8 SRM 駆動試験システム構成

表1 試験条件

電源電圧	200V
回転速度指令範囲	0~3000rpm
回転方向	正転・逆転両方
電流指令リミット値	5A
負荷条件	無負荷

2.3 駆動試験システム

SRM 駆動制御システムを実装し、動作確認を行った。図8に動作試験に用いたSRM 駆動試験システムの構成を、表1に試験条件を示す。試験システムでは、SRMと同軸上にモータに負荷をかけるための誘導電動機（富士電機 MVK-8107A）を接続しているが、今回の動作試験では能動的な負荷はかけないものとし、慣性と軸受の機械的抵抗だけが駆動に影響する形としている。また、SRMと負荷発生用誘導機の間、トルク検出と回転速度検出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 UTM II -10Nm (R)）を設置している。それぞれのモータは簡易光学実験台（駿河精機 J15-1206T）上にボルトで固定されている。制御器にはデジタル制御システム（Myway プラス PE-Expert3）、三相インバータはインバータユニット（Myway プラス MWINV-5R022）、双方向直流電源装置は大容量電源・電子負荷装置（Myway プラス MWBFP2-1040）を用いている。

制御は速度制御で行い、速度指令の範囲は0~3000rpmとし、外部からアナログ信号で与える。回転方向は正転・逆転両方とする。電流指令のリミット値は実証に用いたSRMの仕様から5Aに設定した。

図9に定盤上に設置されているSRMと負荷発生用誘導機の写真を示す。右側がSRM、左側が負荷発生用誘導機である。

3. 結 果

表2に、回転速度指令を最大値（3000rpmとしているが、アナログ信号のため誤差を含む）としたときの定常

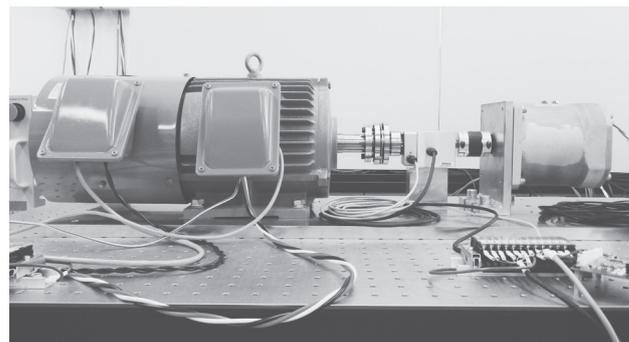


図9 SRMと負荷発生用誘導機写真

表2 回転速度指令最大時の速度測定結果

正転		逆転	
指令値	3063.75rpm	指令値	3071.25rpm
測定値	2865rpm	測定値	3067.5rpm

時回転速度の測定結果を示す。正転では、回転速度指令が3063.75rpmであるのに対して、実際の回転速度の測定値は2865rpmまでしか上昇していない。これは流した電流に対して生じるトルクが小さく、トルク不足となっているためであると考えられる。逆転では、3071.25rpmの指令に対して、実際の回転速度はほぼ同じ値の3067.5rpmまで上昇しており、トルク不足は生じていない。

図10に駆動試験時のU相の電流 i_u とスイッチ $S_{u,l}$ 、 $S_{u,h}$ の状態（Highのときオン、Lowのときオフ）の時間波形を示す。図10(a)と図10(b)は回転速度指令値が大幅に増やされて、電流指令がリミット値に達してフル加速している際の波形、図10(c)と図10(d)は回転速度指令値が大幅に下げられる、もしくは反転させられた際に急減速している際の波形、図10(e)と図10(f)は回転速度指令値が3000rpmの際の定常状態の動作波形を正転・逆転それぞれについて示している。

加速時（図10(a),(b)）の動作波形については、正転・逆転どちらとも電流 i_u がリミット値の5Aまで上昇し、その後ほぼ一定に制御されている。

また、 i_u が5Aまで上昇した後ほぼ一定になっている期間①、②の波形の挙動を見ると、スイッチ $S_{u,l}$ はその間小刻みにオンとオフを繰り返していることがわかる。一方、スイッチ $S_{u,h}$ は期間①ではほとんどオンとなっているが、期間②では②'の部分でオンとオフを繰り返しており、②'を除いた期間でオンとなっている。

このことから、期間①、②においては、②'の部分を除いて、駆動回路を正電圧モードとゼロ電圧モードに小刻みに切り替えて電流制御が行われていることがわかる。これは、図7に示した電流制御時の電流波形の挙動における正トルク発生時の挙動と一致している。逆転時に②'の部分で挙動が異なっていた原因としては、ロータ位置検出の

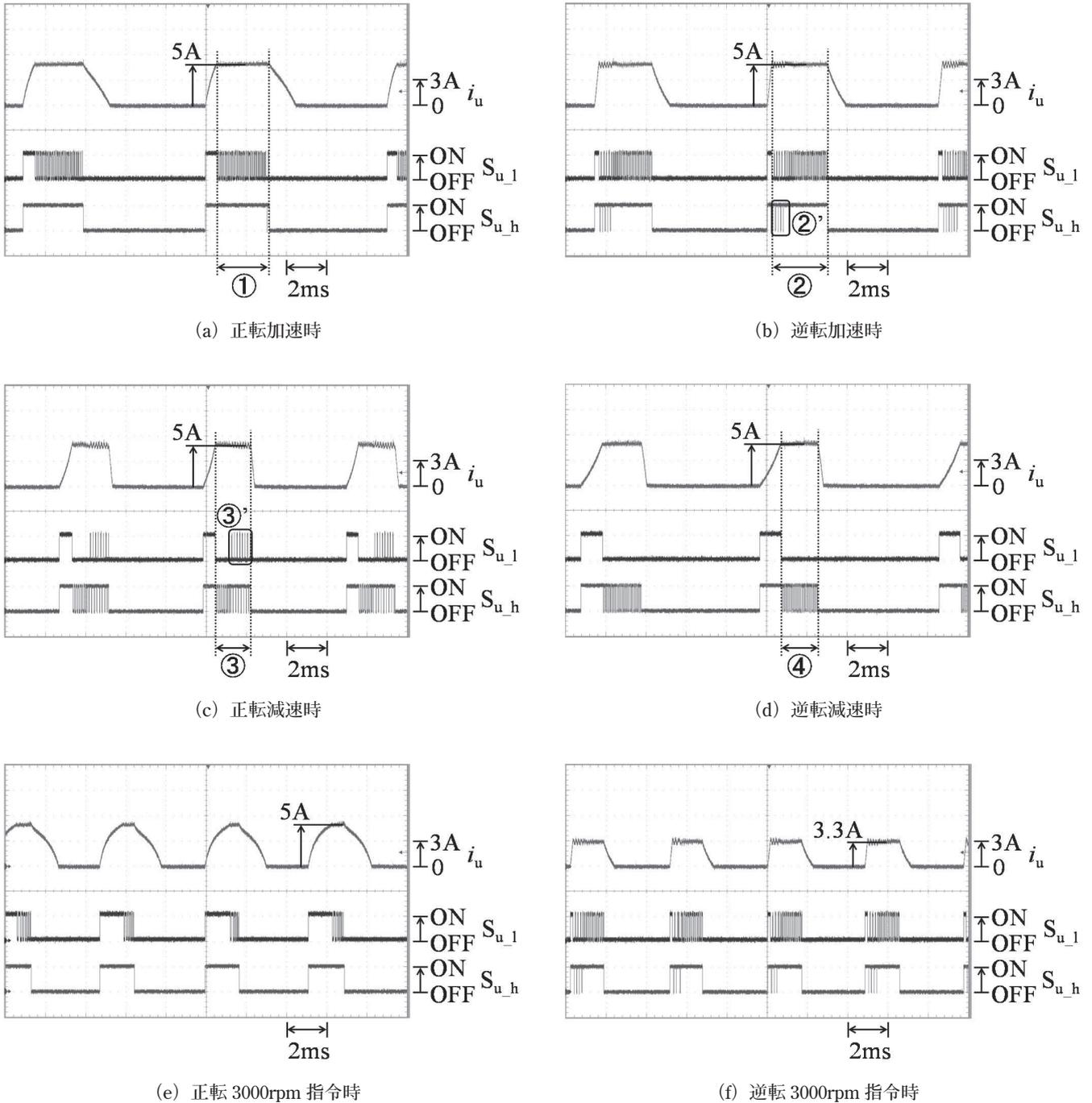


図10 駆動時のU相の巻線電流波形とスイッチ $S_{u,l}$, $S_{u,h}$ の状態

ずれ等のため、ロータの挙動が想定しているものと異なっていたことが考えられる。このことについてはさらに検証が必要である。

減速時(図10(c),(d))の動作波形についても、正転・逆転どちらも i_u がリミット値の5Aまで上昇した後ほぼ一定に保たれていることが確認できる。

また、期間③、④の $S_{u,h}$, $S_{u,l}$ 各スイッチの挙動は、 $S_{u,h}$ は小刻みにオンとオフを繰り返しているのに対して、 $S_{u,l}$ は期間③の③'の部分を除いてほとんどの期間オフしている。③'の部分では $S_{u,l}$ が小刻みにオンとオフを繰り返している。

このことから、期間③、④においては、③'の部分を除いて、駆動回路を負電圧モードとゼロ電圧モードに小刻みに切り替えて電流制御が行われていることが分かる。これは、図7に示した負トルク発生時の挙動と一致する。正転時に③'の部分で挙動が異なっていた原因についても、ロータ位置検出のずれであることが想定されるが、さらに検証が必要である。

3000rpmの回転速度が指令され、定常状態になっている際の電流波形(図10(e),(f))は、正転と逆転ではかなり異なったものとなっている。

正転時は電流の最大値がリミット値の5Aとなっている

のに対して、逆転時は3.3Aとなっている。正転時は電流に対して生じるトルクが小さいため、トルクを出すためにリミット値まで電流が流れている。一方、逆転時は電流が小さくても3000rpmで回転するのに十分なトルクが得られているため、電流の最大値はリミット値より小さくなっている。

また、正転時は電流波形の立上りと立下りが遅く、曲線状になっている。逆転時は電流波形の立上り、立下りが速く、波形が台形に近くなっている。このような電流波形の違いは、巻線のインダクタンスの違いによって生じる。巻線のインダクタンスは、巻かれているステータ突極とロータ突極の距離によって大きく変化する。そのため、正転時と逆転時では、巻線が励磁されているときのステータ突極とロータ突極の距離が異なっているものと考えられる。励磁相の切り替えは、ロータ位置検出情報を基に行っているため、ロータ位置検出にずれがあり、正転時と逆転時で励磁相が切り替わった際のステータ突極とロータ突極の距離が異なっていることが考えられる。

以上の結果から、ホールセンサ信号を用いたヒステリシス制御ベースの電流制御によるSRMの駆動を確認した。今回の検証で判明した問題点として、正転時にトルク不足によって回転速度が上昇しなくなるということが挙げられる。この原因としては、ホールセンサの位置検出のずれが考えられる。今後はこのずれについて検証し、励磁相の切り替えタイミングの補正を検討する必要がある。

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形成制御法. 電気学会論文誌D. 2005, vol.125, no.12, p.1113-1121.
- 3) パウデルリサブ, 石川裕記, 内藤治夫. 瞬時電流フィードバック補償によるスイッチトリラクタンスモータのトルク脈動抑制法. 電気学会論文誌D. 2012, vol.132, no.5, p.534-540.