

スイッチトリラクタンスモータの V/f 制御

熊谷 崇宏*, 伊東 淳一, 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)
加藤 尚和 (長岡モーターディベロップメント株式会社)

V/f control for Switched Reluctance Motor

Takahiro Kumagai, Jun-ichi Itoh, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

Masakazu Kato (Nagaoka Motor Development Co., Ltd.)

1. はじめに

スイッチトリラクタンスモータ(SRM)は、安価な可変速モータとして注目されている。従来の駆動方法は点弧角や消弧角等の複数のパラメータを同時に調整する必要があり、これを解決するために数学モデルに基づいたベクトル制御が提案されている⁽¹⁾。一方、構造が単純で堅牢といった SRM の特徴を生かすためには位置センサレス化が望まれる。位置推定ではインダクタンスの検出精度や回転子位置への変換精度が問題となり、これを改善するためには駆動方法の複雑化や追加回路が必要となる⁽²⁾。そこで、本論文では、位置情報を必要としない V/f 制御を適用した SRM の駆動法を提案する。本論文では提案法の数学モデルに基づく制御原理を述べ、実機による検証結果およびベクトル制御との比較結果を示す。

2. 制御原理

図 1 に提案する SRM の V/f 制御の制御ブロックを示す。本制御法は、(i)ゼロ相電流制御、(ii)V/f 制御、(iii)高効率制御から構成される。ゼロ相電流制御では、ゼロ相電流を PI 制御器により制御することで、仮想回転子磁束を生成する⁽¹⁾。一方、固定子回転磁界はインバータ出力電圧ベクトルの方向を δ 軸と定義し、 δ 軸より 90deg.遅れた軸を γ 軸とする $\gamma\delta$ 軸直交座標系にて V/f 制御を行う。なお、安定化制御は、V/f 制御で駆動する際に生じる慣性モーメントと電機子インダクタンスの共振によるトルク振動を抑制している⁽³⁾。

高効率制御では、インバータ出力電圧を調整することによってトルク/電流比を改善し、効率を向上させる。SRM で最大トルク/電流制御を達成する条件は次式で表される⁽¹⁾。

$$i_0 = i_q \dots\dots\dots (1)$$

$$i_d = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 i_d, i_q は、仮想回転子磁束ベクトルの方向を d 軸、 d 軸から 90deg.遅れた軸を q 軸とした際の d 軸、 q 軸電流である。一方、 i_0 は座標系に関係なく単に電流の直流分である。SRM で最大トルク/電流制御を実現するには、(1)式と(2)式を同時に満たす必要がある。そのため、それぞれを満たすための制御を $i_0=i_q$ 制御、 $i_d=0$ 制御とし説明する。

$i_0=i_q$ 制御については、後述する $i_d=0$ 制御が達成できると

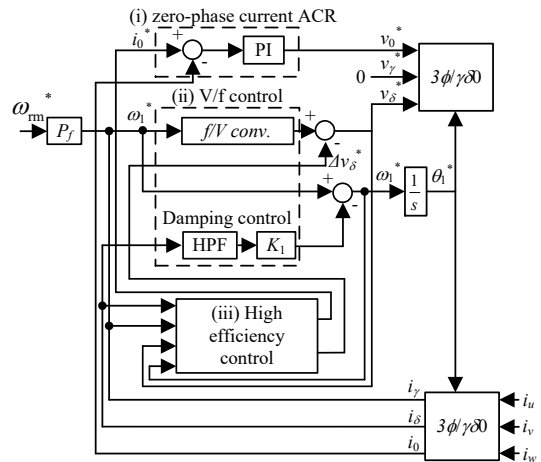


Fig. 1 V/f control method based on $\gamma\delta$ axis.

すれば、 i_q は交流電流振幅 I_{ac} に一致するため、 i_0 を I_{ac} になるように制御すればよい。つまり、ゼロ相電流制御の指令値に次式で表される指令値を与えればよい。

$$i_0^* = i_q = I_{ac} = \sqrt{i_\gamma^2 + i_\delta^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 i_γ, i_δ は γ 軸、 δ 軸電流である。

$i_d=0$ 制御については、SRM の無効電力に着目し、 $\gamma\delta$ 座標系にて間接的に $i_d=0$ 制御を達成する⁽³⁾。dq 座標系では、SRM に入力される無効電力 Q_{dq} は遅れ力率の場合を正とすると次式で表される。

$$Q_{dq} = v_d i_d - v_q i_q = 2\omega \{ L_{dc} (i_d^2 + i_q^2) + L_{ac} i_0 i_d / \sqrt{2} \} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 v_d, v_q は d 軸、 q 軸電圧、 ω は電気角速度、 L_{dc}, L_{ac} は自己インダクタンスの直流、交流成分である。定常状態を考慮して、SRM の dq 座標系での電圧方程式における微分項をゼロとしている。なお、簡単化のため、dq 軸上で 6 次調波として現れる非同期項は無視している。(4)式において、 $i_d=0$ とすれば、次式となる。

$$Q_{dq} = 2\omega L_{dc} i_q^2 = 2\omega L_{dc} I_{ac}^2 = 2\omega L_{dc} (i_\gamma^2 + i_\delta^2) \dots\dots\dots (5)$$

一方、 $\gamma\delta$ 座標系での無効電力 $Q_{\gamma\delta}$ は次式となる。

$$Q_{\gamma\delta} = v_\delta i_\gamma \dots\dots\dots (6)$$

したがって、 $i_d=0$ を達成するには、 $\gamma\delta$ 座標系上で求めた無効電力(6)式が、 $i_d=0$ の場合の無効電力である(5)式に一致するように、 v_δ を調節すればよい。

図2にSRM向けの高効率制御の制御ブロック図を示す。 $i_0=i_q$ 制御は、(3)式をゼロ相電流制御の指令値に与えている。一方、 $i_d=0$ 制御は、(5)式と(6)式の偏差を求め、P制御器にて δ 軸電圧を調節する。なお、P制御器の後段のローパスフィルタは、 v_δ^* の再帰演算を防止すると共に、高周波に対するゲインを小さくすることで、定常的に $i_d=0$ を達成させるために挿入されている⁽³⁾。加えて、過補償にならないように、リミットを設けている。

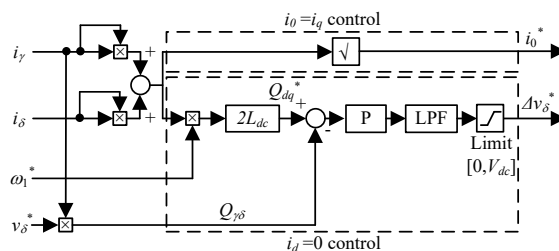


Fig. 2 High efficiency control method.

3. 実験結果

図3に実験システムと供試SRMのモータパラメータを示す。供試SRMは750W, 5000r/min(=1p.u.), 2.39Nm(=1p.u.)の18S/12P型SRMである。負荷側サーボでは、トルク制御により任意のトルクを印加しており、高応答のトルクメータ(UTMII-5Nm, 帯域1kHz, UNIPULSE)により瞬時トルクを測定している。また、V/f比は基底速度(0.6p.u.)で変調率が1になるように設定した。

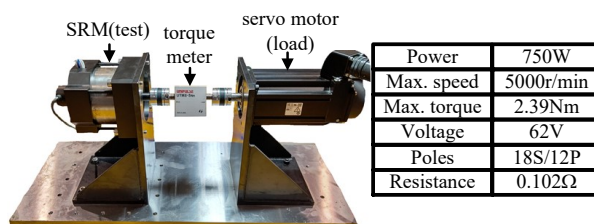


Fig. 3 Experimental equipment and motor parameters of test SRM.

図4に安定化制御の効果を示す。なお、速度0.6p.u., トルク0.5p.u.としている。安定化制御なしの区間では、安定化制御ゲイン $K_1=0$ としている。安定化制御をしている区間ではU相電流およびトルクに振動がないのに対して、安定化制御なしにすると、持続的に振動し、最終的には過電流となる。これらのことから、V/f制御で駆動する際に生じるトルク振動を安定化制御により抑制できていることがわかる。

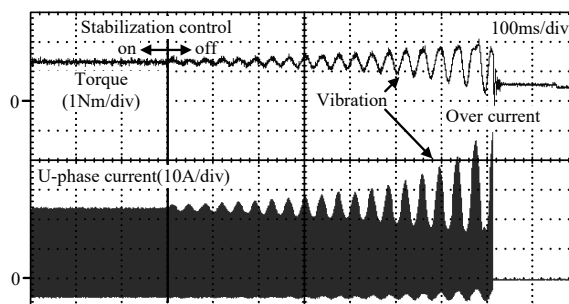


Fig. 4 Effect on the stabilization control.

図5に速度0.6p.u.でトルク0.8p.u.のステップトルクを印加したときの特性を示す。脱調することなく、負荷に追従することがわかる。なお、今回の条件では0.8p.u.以上のトルクステップを印加すると脱調するため、最適なゲイン設定法や安定化限界についての解析は今後の課題とする。

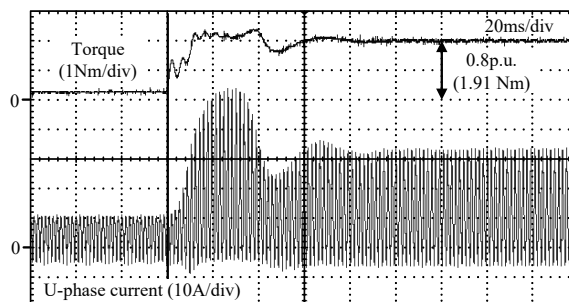


Fig. 5 Step response for 0.80p.u. torque.

図6に速度0.2p.u.時の高効率制御の効果を示す。比較として、位置センサ付きベクトル制御による最大トルク/電流制御、および、V/f制御により $i_0=i_q$ 制御のみをした場合と、 $i_0=i_q$ 制御と $i_d=0$ 制御の両方をした場合を示す。軽負荷ほど、電流は小さくなり制御が効果的である。特に、トルク0.1p.u.時では、 $i_0=i_q$ 制御のみと比較して、 $i_0=i_q$ 制御と $i_d=0$ 制御の両方をした場合は電流実効値を37.9%低減できる。一方で、ベクトル制御による最大トルク/電流制御と比較すると、電流実効値は10.1%増加する。これは、ベクトル制御ではフィードフォワード制御により補償している非同期項を無視しているためであるが、負荷が大きくなるにつれ、相対的に差は小さくなる。なお、ステップトルク印加時同様に、トルク0.8p.u.を超えると脱調する。これは、大電流による磁気飽和の影響であると考えている。今後、トルク応答特性の改善と、非同期項を考慮した更なる高効率化を行う。

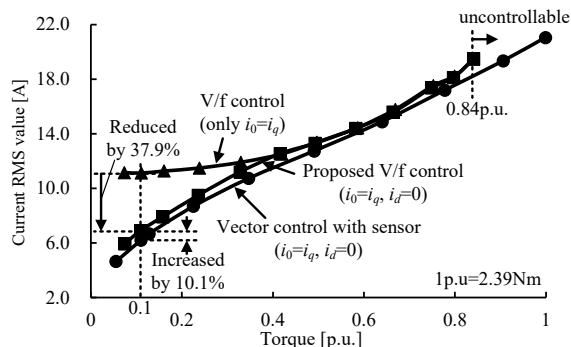


Fig. 6 Effect of high efficiency control (0.2p.u. speed).

文献

- (1)中尾・赤津：電学論 D, Vol.134, No. 12, pp.1006-1015 (2014)
- (2)隈田・出口・岩路：電学論 D, Vol.137, No. 8, pp.612-621 (2017)
- (3)伊東・豊崎・大沢：電学論 D, Vol.122, No. 3, pp.253-259 (2002)