

トルク応答を指定する永久磁石同期電動機の新高速トルク制御法の開発と

そのユニバーサル化

長谷川 勝

本研究では、電動車両用途への適用が拡大している埋込磁石同期電動機を対象に高速トルク制御法を開発したので、その手法について報告する。埋込磁石同期電動機は高効率で高トルク密度化、高出力密度化が可能な電動機として知られており、PWMインバータの発展と相まって、システム全体としての高性能化が要求されており、本手法はこれを具現化する一手法である。また、本手法はトルクの時間微分値を直接操作することを基本原理とするものであり、電磁力をトルク発生原理とする電動機であれば、手法の水平展開(ユニバーサル化)も可能である。なお、本手法はインバータ駆動電動機を動力源とする用途であれば広く適用できることから、電動車両用途のみならず、産業機械、工作機械、家電民生用途など、広く利用できる。

1. はじめに

三相誘導電動機の瞬時トルク制御を可能とする電流ベクトル制御が提案されてほぼ半世紀が経過している。現在では永久磁石同期電動機(以下、PMSM)にも適用され^(例えば1),2)、駆動用インバータの過変調運転や1パルス駆動の利用^{3)~6)}など、今なおその制御性能の向上が進んでいる。一般に電流ベクトル制御系においては、電流制御器は電動機パラメータを用いて極零相殺形設計されたPI制御器と同パラメータを含む非干渉化制御器とにより構成される。ここで、パラメータ変動による不十分な極零相殺やむだ時間が存在する場合、トルク応答は2次系の挙動を示すことが報告されている⁷⁾。このとき、トルク応答の向上を目的に電流制御系の高帯域化を狙うと電流制御性能が低下する。また、正確なパラメータが得られていたとしても、①インバータ出力電圧の飽和によるトルク応答の低下(例えば図1の赤丸内に示すオーバシュートの発生)、②積分制御器におけるワインドアップ現象、③インバータ線形領域から過変調および1パルス駆動への制御器切替によるショック、などは避けられない。これらの問題は、積分器が過去の値を積算して動作することにより発生するものであるため、積分器を用いない制御器が望ましいといえる。

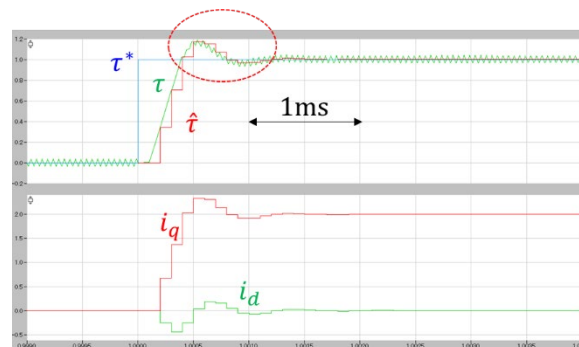


図1 従来法におけるトルク応答波形例

一方、電流制御系をもたない瞬時トルク制御法として直接トルク制御法(以下、DTC)^{8), 9)}トルクフィードバック制御形モデル予測制御(以下、MPC)^{例えば10)}が提案されているが、トルクリプルが大きいあるいは過大な演算量を要求するなどの課題も多い。特に、MPCは後述するようにトルク指令値とトルクとの関係が1階微分方程式で記述可能な制御対象に対するアプローチとしては複雑になりすぎる。

本研究では、上述した電流ベクトル制御法における積分器の問題を回避するために新たな高速トルク制御法を提案する。すなわち、入力をdq軸電圧、出力をトルクとしたときの制御対象が時変係数をもつ(形式上は)線形方程式と積分器とから構成されていることに着目する。これにより、トルク補償器を比例器のみで構成したとしても、内部モデル原理によりトルク指令値に対し出力トルクが定常誤差無く追従することが保証される。このため、本制御器では過去の値を用いることなく、現在のトルクから1サンプル後のトルクの挙動を制御することになる。これにより、積分器に起因する種々の問題から解放され、トルク応答の両立が実現可能となる。

以下、本稿では埋込磁石同期電動機(以後、IPMSM)を対象として本提案法のアルゴリズムを具体的に述べ、実験によりその有効性を示す。なお、本手法は磁界生成機能をもつ巻線をもち、電磁力をトルク源とする電動機に対してもアルゴリズムの微調整により適用が可能であり(手法のユニバーサル化)、この結果についても示す。

2. トルク応答を指定するトルク制御法と電圧指令値選定法

前章で述べた積分器に起因する問題を解決するため、本章では積分器を用いることなくトルク応答を直接的に指定することのできる新しいトルク制御法を提案する。

2.1 トルク応答に適した数学モデル

一般に、回転子に同期して回転する回転座標系(dq座標系)上におけるIPMSMの数学モデルと出力トルク τ は次式で与えられる

$$p i_d = \frac{v_d - R i_d + \omega_{re} L_q i_q}{L_d}, \quad p i_q = \frac{v_q - R i_q - \omega_{re} L_d i_d - \omega_{re} \Phi}{L_q} \quad (1)$$

$$\tau \equiv f(i_d, i_q) = P \left((L_d - L_q) i_d i_q + \Phi i_q \right) \quad (2)$$

ここで、 p は微分演算子(d/dt)、 P は電動機の極対数である。電流ベクトル制御においては、(1)式と(2)式を制御対象とみなし、 i_d 、 i_q を所定の値に制御することで(3)式に従って発生する τ を制御している。このため、制御対象たるIPMSMを図2のように捉えているといえる。同図より、 i_d 、 i_q を所定の値に維持するためには非零の v_d 、 v_q が要求されるため、電流制御器内部に積分器をもたせる必要がある。電圧制約時においては、この積分器のワインドアップ現象によりトルク制御性能が劣化するため、アンチワインドアップ対策に技巧を要することになる。

これに対し、 $\tau = \frac{1}{s} \dot{\tau}$ と捉え、 $\dot{\tau}$ を操作することにより積分制御器を用いることなく内部モデル原理を利用してトルク τ を定値制御することを考える。そこで、本稿ではトルク応答を指定できるような制御対象表現を考える。(2)式よりトルクの時間微分値 $\dot{\tau}$ を求め、これに(1)式を代入すると

$$\dot{\tau} \equiv g(v_d, v_q) = A(i_d, i_q) v_d + B(i_d, i_q) v_q + C(i_d, i_q, \omega_{re}) \quad (3)$$

が得られる。ただし、 $A(i_d, i_q)$ 、 $B(i_d, i_q)$ 、 $C(i_d, i_q, \omega_{re})$ は導出の過程で表れる時変係数である。(3)式よ

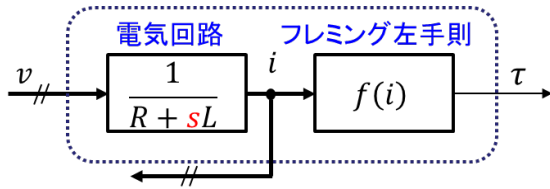


図2 従来法における電動機モデルの捉え方

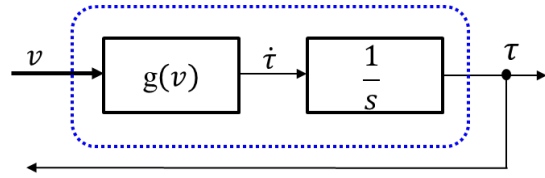


図3 提案法における電動機モデルの定義

り、制御対象を図3のように表すことができ、以下の3つの特徴をもつ。

1. (3)式は電圧に対して静的関数であるため、 v_d, v_q によって直ちに \dot{i} が指定できる。これは、トルク軌道をも管理できることを意味する。
2. 形式上、(3)式は線形記述されるため、 \dot{i}^* を実現する電圧指令ベクトル $\mathbf{v} = (v_d^*, v_q^*)$ の求解が極めて容易である。なお、*は指令値を表す。
3. 制御対象に積分器 $1/s$ が含まれるため、比例制御器のみの補償器で τ の定値制御が可能となる。これより、従来法における制御器内の積分器に対するアンチwindアップ処理が不要になる。

2.2 トルク応答を指定するフィードフォワード補償器

図3に示した通り、制御対象たる IPMSM は静的関数 $\dot{i} = g(\mathbf{v})$ と積分器 $1/s$ とで表現される。したがって、 $\dot{i} = g(\mathbf{v})$ の逆関数を補償器として用いればトルク微分指令値 \dot{i}^* に対するフィードフォワード制御器が構成でき、トルク応答を指定する機能をもたせることが可能になる。ただし、本逆関数 $\mathbf{v} = g^{-1}(\dot{i}^*)$ は 1 入力 2 出力となる不定方程式となるため、制約条件を追加して電圧指令値 $\mathbf{v}^* = (v_d^*, v_q^*)$ を得る必要がある。この詳細は 2.4 節で述べる。

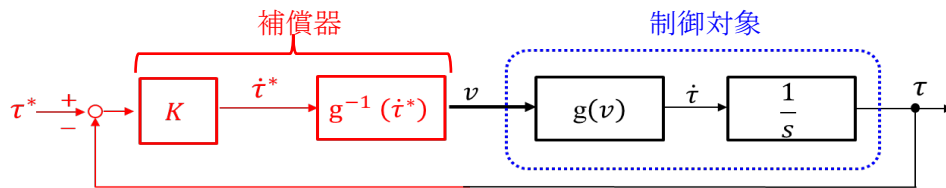


図4 提案するトルク応答指定型トルクフィードバック制御系の構成

2.3 トルクフィードバック補償器

本節ではトルクフィードバック補償器について述べる。前節において静的関数 $\dot{i} = g(v_d, v_q)$ の逆関数が正確に得られているならば $g(\mathbf{v}) \cdot g^{-1}(\dot{i}^*) = 1$ となるため、 $\dot{i}^* = \dot{i}$ が達成される。これに対して比例ゲイン K のみによるトルクフィードバック制御系を構成すると本制御系は図4に示すように簡易化することができる。同図より、 τ^* から τ までの閉ループ伝達関数は

$$\tau = \frac{K}{s + K} \tau^* \quad (4)$$

となり、時定数が $1/K$ の1次遅れ系という極めて簡単な制御系となる。さらに、定常状態($s = j0$)においては $\tau = \tau^*$ となるため、出力電圧が飽和せず、かつパラメータに誤差がない場合には補償器に積分器をもたなくても定値制御が可能になる。また、本フィードバック補償器には積分要素が含まれないため、たとえ上記の前提を満足していなくても2次系の応答が表れることはない。これにより、制御器に含まれる積分器に起因するトルク応答の低下、windアップ現象の回避が可能となる。

2.4 電圧指令ベクトルの選定法

前節では、補償器として積分器を用いずとも定値の τ^* に対して τ を定常誤差なく制御可能なト

トルクフィードバック制御器について述べた。ただし、2.2節で指摘したように、トルク微分値拘束式 $\dot{\tau}^* = g(\mathbf{v})$ の解は図5に示す直線上の任意の点となるため、 $\mathbf{v}^* = (v_d^*, v_q^*)$ を一意に定めることはできない。本稿では(3)式を解く際に

1. 要求された τ^* に対して電流ベクトル $\mathbf{i} = (i_d, i_q)$ の振幅を最小化する(図5中、 \mathbf{v}_1^*)
 2. 要求された τ^* に対して電圧指令ベクトル $\mathbf{v}^* = (v_d^*, v_q^*)$ の振幅を最小化する(図5中、 \mathbf{v}_2^*)
- の一方を制約条件として追加する。前者は高効率運転を実現する銅損最小制御に、後者は高回転化を実現する弱め界磁制御に相当する。その詳細は文献11)を参照されたい。

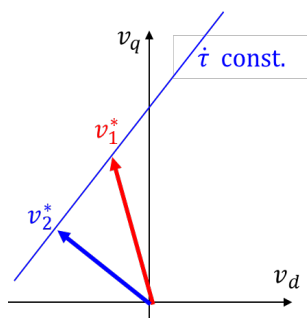
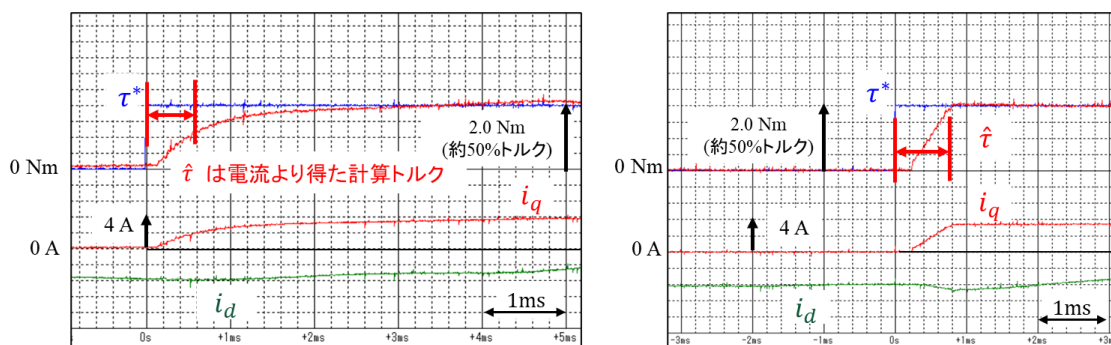


図5 トルク微分値拘束直線と電圧指令ベクトルの選定

3. 実験

3.1 実験装置および制御系の設計条件

本実験では定格 1.5kW, 3,600min⁻¹ の IPMSM を供試機として用いた。制御演算は DSP(Digital Signal Processor, TI 社 : TMS320C6713B)によって行った。また、供試機用三相電圧形インバータのキャリア周波数は 10kHz とし、PWM 信号は FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて生成した。なお、各制御器の演算は PWM 波形生成用三角波キャリアに同期して実行されるため、制御周期 T_s は 100 μ s となる。また、一般的には高速なトルク検出は価格、設置の観点から困難であるので、 $\hat{\tau} = P((L_d - L_q)i_d i_q + \Phi i_q) + \dot{\tau}^* T_s$ によって推定し、これをトルクフィードバック制御系に用いている。なお、本式の最終項 $\dot{\tau}^* T_s$ はスミス法による無駄時間補償項である。



(a) $K = 2,000\text{rad/s}$ 時 (時定数設計値 500 μ s) (b) $K = 5,000\text{rad/s}$ 時 (時定数設計値 200 μ s)

図6 トルクステップ応答

3.2 トルク応答指定制御の評価

図6に提案法によるトルクステップ応答を示す。なお、同図(a)は電圧指令値が飽和しないように $K = 2,000\text{rad/s}$ 、トルク指令値を定格の 50%に設定したものである。同図から読み取れる時定数は 600 μ s であり、制御遅れ時間 100 μ s を考慮すれば妥当な結果といえる。一方、同図(b)は出力電圧

制限により本装置では実現し得ない性能を設計値として与えたものである。トルク値は指令値変更直後から最大レートで直線的に増加し、トルク指令値との一致後はその値を維持している。

以上より、本提案法を用いれば比例器のみフィードバック補償器で τ の定値制御が実現でき、かつ出力電圧制限内の駆動条件であれば K によりトルク応答の指定が可能であるといえる。

4. 制御法の種類電動機への適用(ユニバーサル化)

本手法は、トルク微分値が時変係数をもつ 1 階微分方程式を制御対象の数学モデルとすることを起点にした制御法である。したがって、この条件を満たせば手法の水平展開(ユニバーサル化)ができる。すなわち、磁界を生成する巻線を持ち、かつ電磁力をトルク発生源とする他電動機への適用も可能となる^{12)~15)}。なお、紙面の都合により 2 種類の電動機に対する結果のみ示す。

4.1 同期リラクタンスモータへの適用

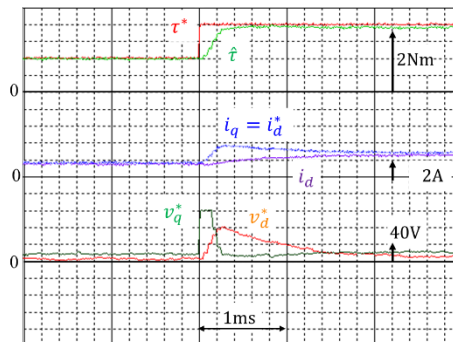


図 7 同期リラクタンスモータにおけるトルクステップ応答

図 7 に同期リラクタンスモータ(永久磁石をもたない同期電動機)への適用結果を示す。本電動機は界磁源として磁石をもたないことから大電流を流す必要があり、その電流値によってインダクタンスが大きく変動する非線形性の強い電動機である。しかしながら、本手法を適用することによって高速かつオーバーシュートレスなトルク応答が実現できることが図 7 よりわかる。

4.2 スイッチトリラクタン্সモータへの適用

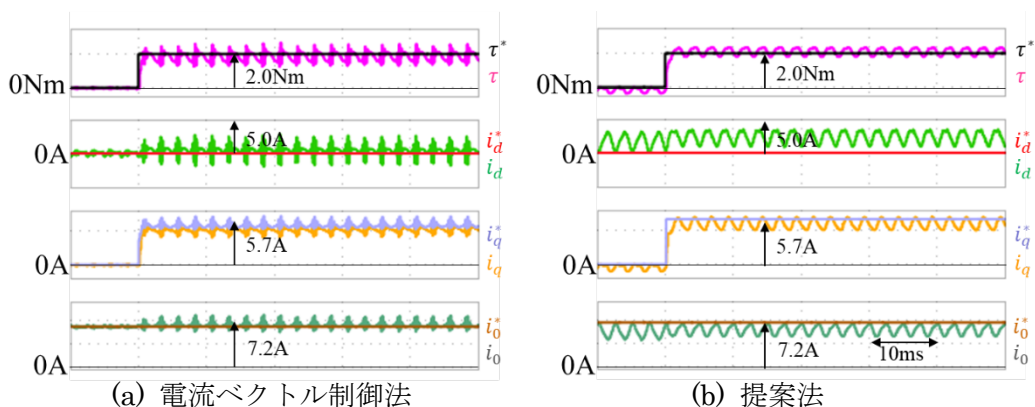


図 8 スイッチトリラクタン্সモータにおけるトルクステップ応答(シミュレーション)

図 8 にスイッチトリラクタン্সモータ(歯数の少ないステッピングモータともいえる)への適用結果を示す。本電動機も界磁源として永久磁石をもたず、かつ磁気特性の空間的等方性をもたないことから、電流値ならびに回転子位置によってインダクタンスが大きく変動する。しかしながら、本手法を適用することによってトルクリプルの低減が達成可能であることが図 8 よりわかる。

5. おわりに

本稿では、PWM インバータ駆動の PMSM に対する新たな高速トルク制御法を提案し、実験に

よりその有効性を明らかにした。本手法は、標準技術である電流ベクトル制御と直接トルク制御法(DTC)における各長所を併せ持ち、かつモデル予測制御に基づく方法^{例えば10)}に比べて低演算負荷で優れたトルク制御性能が実現できる。さらに、本稿では本手法の水平展開(ユニバーサル化)を図り、誘導電動機、強い磁気的非線形性をもつ同期リラクタンスマータ、スイッチトリラクタンスマータ、二重三相永久磁石同期電動機に本手法を適用し^{12)~15)}、その妥当性も示した。

参考文献

- 1) L. Smith, 道木慎二, 大熊繁: 電圧飽和領域における IPMSM の高トルク応答のための新しい電圧リミッタ, 電気学会論文誌 D, **128**, 12 (2008) p.1346-1356
- 2) 高橋健治, 大石潔, 上町俊幸: d 軸電圧を優先した埋込型永久磁石同期モータの一駆動法, 電気学会論文誌 D, **131**, 9 (2011) p. 1103-1111
- 3) 中山陽介, 道木慎二: インバータ過変調領域での PMSM ベクトル制御を可能とする帯域除去フィルタの設計, 電気学会論文誌 D, **138**, 11 (2018) p. 884-893
- 4) H. Nakai, H. Ohtani, E. Satoh, Y. Inaguma: Development and Testing of the Torque Control for the Permanent-Magnet Synchronous Motor, IEEE Trans. Ind. Electron., **52**, 3 (2005) p.800-806
- 5) 栗田壮一郎, 吉田篤史, 近藤圭一郎: 永久磁石同期電動機の弱め磁束領域におけるトルク電流フォードバック制御への 1 パルスモードの適用, 電気学会論文誌 D, **135**, 6 (2015) p. 671-678
- 6) 松木洋介, 梶浦裕章, 電圧振幅・位相制御に適した新座標系に基づく IPMSM の高応答トルク制御法, 電気学会論文誌 D, **135**, 11 (2015) p.1123-1129
- 7) 岩下平輔, 垣木亮太郎, 猪飼聡史, 飯島一憲, 園田直人: 永久磁石同期電動機の高精度駆動のための電圧飽和を回避し磁気飽和を考慮した電流制御パラメータ決定法, 精密工学会誌, **83**, 7 (2017) p. 706-712
- 8) I. Takahashi and T. Noguchi: A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor, IEEE Trans. Ind. Appli., **22**, 5 (1986) p.820-827
- 9) 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之: 埋込磁石同期モータの直接トルク制御によるセンサレス駆動とトルク応答改善法, 電気学会論文誌 C, **128**, 1 (2008) p.78-86
- 10) 嶋岡雅浩, 道木慎二: モデル予測制御に基づく PMSM 電流制御系の定常電流制御性能改善のための探索空間設計, 電気学会論文誌 D, **140**, 6 (2020) p.468-479
- 11) 片瀬貴也, 長谷川勝, 河村尚輝: トルク応答を指定する永久磁石同期電動機のトルク制御法, 電気学会 モータドライブ/回転機/自動車合同研究会資料, MD-21-083/RM-21-047/VT-21-008 (2021) p.45-50
- 12) 高田卓馬: 誘導電動機の電圧ベクトル制御, 電気電子システム工学科卒業論文 (2023)
- 13) 萩永裕太, 長谷川勝: トルク応答を指定するトルク制御法のシンクロナスリラクタンスマータへの適用, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会 (2022) p.A1-4
- 14) 藤井勝路, 河村尚輝, 長谷川勝: トルク応答を指定するトルク制御法のスイッチトリラクタンスマータへの適用, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会 (2022) p.A1-5
- 15) 阿部太貴, 長谷川勝: トルク微分値操作に基づくトルク制御法の二重三相永久磁石同期電動機への適用, 電気学会全国大会, 5-099 (2023), p.177