突極特性を持つ同期モータベクトル制御 のための再帰形指令電流生成法

正員 新中 新二 (神奈川大学)

A Current Command Generating Method in Recursive Form for Vector Control of Salient Synchronous Motor

Shinji Shinnaka, Member (Kanagawa University)

キーワード：突極性、同期モータ、ベクトル制御、指令値

1. はじめに

突極形同期モータは、リラクタンストルクを活用した効率的な駆動が可能である。この種の駆動の制御には、銅損を最小とするような最小電流制御、力率を最大化する最大力率制御などがあり、これを達成する電機子電流の d、q 軸成分指令値による解軌跡（または、d、q 軸成分の相対的關係）も明らかにされている^{(1) - (5)}。

ベクトル制御の遂行に際しては指令電流の具体的な値が必要であり、この指令電流は当然のことながら所要のトルクを発生するものでなくてはならない。ところが、実用に際し不可欠な d q 指令電流の発生トルクに対応した実時間決定法は、ほとんど研究なされていないようである。国内においては森本らが上位の速度制御系が構成されることを前提に指令トルクに代わって速度偏差により最小電流制御のための指令電流生成法を、一方海外においては Jahns らが、3 相電流レベルでの最小電流制御の遂行に関し、モータパラメータで正規化した指令トルクから正規化した指令電流を関数発生器で生成する考え（肝心の関数の決定と実現の方法はまったく不明）をわずかに示しているに過ぎないようである^{(4)、(5)}。

本論文は、(正逆)突極形同期モータの効率駆動に不可欠な、所要トルクに応じた d q 指令電流の一決定法を提案するものである。提案の方法は、種々の効率的駆動に適用できるという汎用性と、再帰形決定法ながら 2 回の再帰計算で適切な値を決定できるという実時間性とを有している。

2. 問題の定式化とアプローチ

回転子の N-S 極の軸方向に d 軸が位相差なく同期した直交 d q 座標系を考える。この同期座標系では、発生トルク τ と電機子電流 i_d, i_q は次のような非線形な関係を有する。

$$\tau = N_p (\Phi + 2L_b i_d) i_q \quad (1)$$

ここに、 N_p は極対数を、 Φ は回転子による磁束レベルを示している。また、 $L_b \neq 0$ は磁路の磁気抵抗の非一様性に起因して生じた電機子インダクタンスであり、d q 軸イン

図1 指令電流生成の基本手順を示すブロック図
Fig. 1 Basic process for generating current commands

ダクタンス L_d, L_q と次の関係を有している。

$$2L_b = L_d - L_q \quad (2)$$

一方、効率的な駆動においては電機子電流は、解軌跡を表現した次の関係を満足しなければならない。

$$h(i_d, i_q) = 0 \quad (3)$$

本論文で考える問題は、与えられた指令トルク τ^* に対応し、(1)式と(3)式の関係を同時に満足する指令電流 i_d^*, i_q^* を決定するアルゴリズムを構築することである。

本論文では、図1に示したように、指令トルク τ^* より先ず q 軸指令電流 i_q^* を決定し、次に q 軸指令電流 i_q^* より d 軸指令電流 i_d^* を決定する方法を採用する。(3)式は、次式のように書き改められるので、

$$i_d = f(i_q) \quad (4)$$

採用の方法では、指令トルク τ^* からの q 軸指令電流 i_q^* の決定法が支配的に重要となる。なお、このときの関数 $f(\bullet)$ は少なくとも部分的には単調である。

3. 再帰形決定法

<3.1> 基本アルゴリズム

定理：関数 $f(\bullet)$ が単調ならば、次の再帰形アルゴリズムにより正規化指令トルク $c^* = \tau^* / N_p$ に応じた q 軸指令電流を決定できる（図2参照）。

$$i_q^*(k-1) = f(i_q^*(k-1)) \quad (5)$$

図2 q軸指令電流生成の基本構成

Fig.2 Basic structure for generating q current command

$$K_t(k-1) = \Phi + 2L_b i_d^*(k-1) \quad (6)$$

$$i_q^*(k) = i_q^*(k-1) + \gamma \left(\frac{c^*}{K_t(k-1)} - i_q^*(k-1) \right) \quad (7)$$

$$0 < \gamma < 2 \quad (8)$$

略証：正規化指令トルクに関する誤差 $e(k)$ を

$$e(k) = c^* - K_t(k) i_q^*(k) \quad (9)$$

と定義すると、(7)式より次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} (1-z^{-1})e(k) &= K_t(k-1)(1-z^{-1})i_q^*(k) + ((1-z^{-1})K_t(k))i_q^*(k) \\ &= \gamma z^{-1}e(k) + ((1-z^{-1})K_t(k))i_q^*(k) \end{aligned} \quad (10)$$

$$(1-(1-\gamma)z^{-1})e(k) = ((1-z^{-1})K_t(k))i_q^*(k) \quad (11)$$

関数 $f(\bullet)$ の単調性より (11) 式右辺の $(1-z^{-1})K_t(k)$ は漸減し得るので、(8)式のゲイン γ に対しては、 $e(k) \rightarrow 0$ となる。

$e(k) \rightarrow 0$ は (9) 式より適切な $i_q^*(k)$ の決定を意味する。

<3.2> 応用アルゴリズム

基本形である (5)～(8) 式の基づいたバリエーションとして、種々の応用アルゴリズムを得ることができる。この1例を下に示す。

$$i_q^*(k) = \text{Lmt} \left(\frac{c^*}{K_t(k-1)} \right) \quad (12)$$

$$i_d^*(k) = f(i_q^*(k)) \quad (13)$$

$$K_t(k) = \Phi + 2L_b i_d^*(k) \quad (14)$$

(12) 式における $\text{Lmt}(\bullet)$ は非線形なリミッタ処理に対応したリミッタ関数を示している。

上の応用アルゴリズムは、基本アルゴリズムに対し、設計パラメータであるゲインを $\gamma=1$ と選定し、q軸指令電流の処理中間値の不要な増大を抑えるべくリミッタ関数を導入し、更に、今回の指令値 c^* に対応した d 軸指令電流の最終値 $i_d^*(k)$ を次回指令値 c^* に対応した演算の初期値 $i_d^*(0)$ 、 $K_t(0)$ に利用する、といった工夫を行ったものである。なお、(12)～(14)式では、今回最終値 $i_d^*(k)$ を次回初期値 $i_d^*(0)$ に利用する関係を表現すべく、この処理をアルゴリズムの後段に配置している。

4. 数値実験例

図3 提案アルゴリズムによる収束応答の1例

Fig. 3 An example of convergence performance by the proposed recursive algorithm

提案アルゴリズムの収束性能を確認すべく、 $f(\bullet)$ として最小電流制御、最大力率制御等の規範を選定し、数値実験を実施した。図3は、最小電流制御に対し、(12)～(14)式を利用した場合の応答の1例である。実験条件は以下の通りである。

$$i_d = f(i_q) = \frac{-\Phi + \left(\Phi^2 + (4L_b i_q)^2 \right)^{1/2}}{4L_b}$$

$$\Phi = 0.3(\text{Nm/A}), L_d = 0.002(\text{H}), L_q = 0.006(\text{H})$$

$$c^* = 3 \text{ or } -1(\text{Nm}), \text{Lmt}(\bullet) = \pm 15$$

同図の (a) は $c^*, K_t(k) i_q^*(k)$ を、(b) は $i_q^*(k)$ を、(c) は $i_d^*(k)$ を、(d) は $i_q^*(k) - i_q^*(k-1)$ を示している。1回で約95%、2回でほぼ100%と言う高速な収束性能が確認された。

5. おわりに

以上、効率重視のベクトル制御の実用化に不可欠な、指令トルクに応じた指令電流の生成法として、汎用性、収束性、計算負荷の面で優れたアルゴリズムを提示した。

(平成9年11月20日受付)

文 献

- (1) 大沢・野村「逆突極PMモータドライブの機器利用率の向上」、平成9年度電気学会全国大会 (IV)、pp. 348-349 (平9)
- (2) 森本・大山・藤井：「リラクタンス併用PMモータと駆動システム」、平成8年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 (III)、pp. S118-S123 (平8)
- (3) 西方・星田・石澤：「同期電動機の弱め界磁速度制御系における力率1制御」、平成8年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 (III)、pp. 135-136 (平8)
- (4) 森本・畑中・童・武田・平紗：「PMモータの弱め磁束制御を用いた広範囲可変速運転」、電学論D、112、pp. 292-298 (平4)
- (5) T.M.Jahns, G.B.Kliman, T.W.Newmann: 「Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives!」、IEEE Trans. Industr. Appl., IA-22, pp. 738-747 (1986)

新 中 新 二 (正員) 電学論D、117巻、10号、p. 1247 参照。