

105 パラメータ同定機構による誘導電動機の世界速度センサレス制御法

野口 季彦

高橋 勲

(岐阜工業高等専門学校) (長岡技術科学大学)

A New Induction Motor Control without a Speed Sensor

Based on Parametric Identification

Toshihiko Noguchi

Isao Takahashi

(Gifu Technical College) (The Technological University of Nagaoka)

ABSTRACT

In recent years, several papers have been reported on a field oriented control which has no speed sensors. Each scheme needs very complex calculations for estimating rotor flux and rotating speed. Especially, it can be thought necessary for the approaches which employ an adaptive system or a flux observer to set system parameters accurately and to calculate higher dimensional matrices. It is also known that thermal variations of the secondary resistance affect badly not only a torque control but also a speed control. This paper proposes a new control strategy without a speed sensor, which is not based on the above field oriented approaches but gives a very simple configuration. Theoretical discussions on speed estimation and torque and flux control are described. And excellent characteristics of these methods are examined using digital simulation technique.

1. はじめに

従来より速度センサレスベクトル制御として種々の方式^{(1)~(4)}が提案されているが、そのいずれの方式も二次磁束や回転速度の推定に複雑な演算を必要とする。特に適応制御システムやオブザーバを利用したものは高精度なパラメータの設定と非常に複雑な行列演算を行う必要があると考えられる。さらにベクトル制御では温度変動による二次抵抗の変化がトルク制御と速度制御の相互に複雑な影響を及ぼすことが知られており、その補償法が重要な課題となっている。このため近年ではより一層の実用化に向けた研究も行われ、オブザーバを簡略化した方式や原理的に従来のベクトル制御に立脚しないもの^{(5)~(6)}も提案されている。後者の方式は二次抵抗の影響がトルク制御に現れない点で優れているが、速度推定に複雑なベクトル演算を必要とするためベクトル制御と同様の問題が残されている。したがってシステムの実用化という点からはベクトル制御と異なるアプローチで速度推定法を大幅に簡素化する必要があるといえよう。本論文はこのような観点から新しい速度センサレス制御法を提案するものである。

2. 誘導電動機の世界方程式

任意の角周波数 ω で回転する γ 座標において、一次磁束鎖交数に着目した誘導電動機の世界方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_{1\gamma} \\ v_{1\delta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & p & -\omega \\ 0 & R_1 & \omega & p \\ -(R_2+pL_s) \frac{L_{11}}{M} & (\omega-\omega_n) \frac{L_{11}L_s}{M} & (R_2+pL_2) \frac{1}{M} & -(\omega-\omega_n) \frac{L_{22}}{M} \\ -(\omega-\omega_n) \frac{L_{11}L_s}{M} & -(R_2+pL_s) \frac{L_{11}}{M} & (\omega-\omega_n) \frac{L_{22}}{M} & (R_2+pL_2) \frac{1}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\gamma} \\ i_{1\delta} \\ \psi_{1\gamma} \\ \psi_{1\delta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

このとき出力トルク T は(2)式で表される。

$$T = i_{1\delta} \psi_{1\gamma} - i_{1\gamma} \psi_{1\delta} \quad (2)$$

ただし、

v_{1r}, v_{1s} : r 軸、 s 軸一次電圧 i_{1r}, i_{1s} : r 軸、 s 軸一次電流 ψ_{1r}, ψ_{1s} : r 軸、 s 軸一次磁束鎖交数

ω : r, s 座標の角周波数 ω_m : 回転子角速度 R_1, R_2 : 一次、二次抵抗 L_{11}, L_{22} : 一次、二次自己インダクタンス

M : 一次二次間相互インダクタンス L_s : 漏れインダクタンス ($= \frac{L_{11}L_{22}-M^2}{L_{11}}$) p : 微分演算子 ($= \frac{d}{dt}$)

である。

次に(1)式は状態方程式の形に変形すると(3)式のようになる。

$$p \begin{bmatrix} i_{1r} \\ i_{1s} \\ \psi_{1r} \\ \psi_{1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1 L_{22} + R_2 L_{11}}{L_{11} L_s} & \omega - \omega_m & \frac{R_2}{L_{11} L_s} & \omega_m \frac{L_{22}}{L_{11} L_s} \\ -(\omega - \omega_m) & -\frac{R_1 L_{22} + R_2 L_{11}}{L_{11} L_s} & -\omega_m \frac{L_{22}}{L_{11} L_s} & \frac{R_2}{L_{11} L_s} \\ 0 & 0 & -R_1 & 0 \\ 0 & -R_1 & 0 & -\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1r} \\ i_{1s} \\ \psi_{1r} \\ \psi_{1s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_{22}}{L_{11} L_s} & 0 \\ 0 & \frac{L_{22}}{L_{11} L_s} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{1s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. パラメータ同定機構による速度推定法

上式で ω を一次磁束鎖交数の角周波数 ω_1 と等しくし、 r 軸と一次磁束鎖交数ベクトル ψ_1 の方向を一致させると

$$\omega = \omega_1 \quad (4)$$

$$\omega_m = \omega_1 - \omega_s \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{1r} \\ \psi_{1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\psi_1| \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

のようにおくことができる。ただし、 ω_s は一次磁束鎖交数に対するすべり角周波数である。ここで一次磁束鎖交数一定制御を仮定し $|\psi_1| = \text{一定}$ とする。これらの条件を(3)式へ代入してまとめると一次電流 i_{1r}, i_{1s} について次のように簡単な状態方程式が得られる。

$$p \begin{bmatrix} i_{1r} \\ i_{1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_2}{L_s} & \omega_s \\ -\omega_s & -\frac{R_2}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1r} \\ i_{1s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_2}{L_{11} L_s} \\ \omega_s \frac{L_{22}}{L_{11} L_s} \end{bmatrix} |\psi_1| \quad (7)$$

前述のように $|\psi_1| = \text{一定}$ であるから、これより i_{1r}, i_{1s} は ω_s の関数として直線的に変化することがわかる。そこで ω_s を可調節パラメータとした並列式モデル規範適応システムに基づく同定機構を考える。この場合プロセスとしては実際の誘導電動機を想定し、並列モデルとしては(7)式の各変数を推定値に置き換えた数学モデルを想定する。また同定アルゴリズムには最も一般的な比例積分要素を採用して出力誤差 ϵ を収束させる。

図1は以上に述べたすべり角周波数同定機構を示したもので、回転座標変換を必要とするものの非常に簡単な構成となる。この同定機構から得られた $\hat{\omega}_s$ を用いて回転子角速度の推定値 $\hat{\omega}_m$ は次式で求めることができる。

$$\hat{\omega}_m = \omega_1 - \hat{\omega}_s \quad (8)$$

この速度推定法では一次磁束鎖交数の角周波数 ω_1 を求める必要があるが、これについても後述のように簡単に演算することができる。

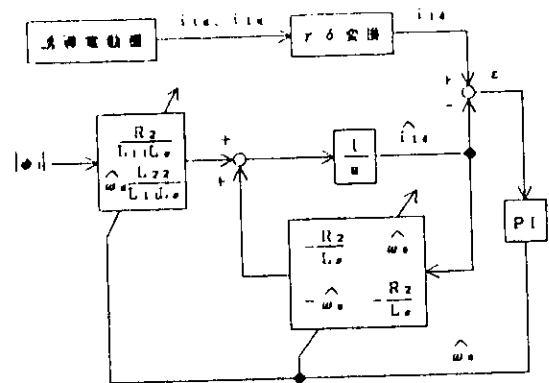


図1 すべり角周波数同定機構
Fig.1 Slip Frequency Identifier

4. 一次磁束鎖交数および出力トルクの制御

(1) 式の各変数について $\gamma \rightarrow d$ 、 $\delta \rightarrow q$ 、 $\omega \rightarrow 0$ とすれば、容易に $\gamma \delta$ 座標上の特性方程式を静止した $d q$ 座標上のそれに変換することができる。したがって $d q$ 座標における特性方程式は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ -(R_2+pL_s) \frac{L_{11}}{M} & -\omega_m \frac{L_{11}L_r}{M} & (R_2+pL_{22}) \frac{1}{M} & \omega_m \frac{L_{22}}{M} \\ \omega_m \frac{L_{11}L_r}{M} & -(R_2+pL_s) \frac{L_{11}}{M} & -\omega_m \frac{L_{22}}{M} & (R_2+pL_{22}) \frac{1}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(9) 式の第1行および第2行から $d q$ 座標における一次磁束鎖交数 ψ_{1d} 、 ψ_{1q} は次のように求められる。

$$\begin{bmatrix} \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \end{bmatrix} = \frac{1}{p} \begin{bmatrix} v_{1d} - R_1 i_{1d} \\ v_{1q} - R_1 i_{1q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

この式は一次側諸量だけを用いて演算可能な点で優れているが、完全積分を必要とするため低周波領域で問題となる。そこで速度センサレス制御による実用的な速度制御範囲 (1 : 100 程度) を考慮し、実際には一次遅れ要素によって積分動作を近似する。以上のようにして求めた ψ_{1d} 、 ψ_{1q} を用いれば ψ_1 の絶対値 (振幅) $|\psi_1|$ は (11) 式により演算することができる。

$$|\psi_1| = \sqrt{\psi_{1d}^2 + \psi_{1q}^2} \quad (11)$$

一方、出力トルク T は (6) 式を (2) 式へ代入することにより次のように簡単に求めることができる。

$$T = i_{1q} |\psi_1| \quad (12)$$

次にこれらの演算結果をもとに一次磁束鎖交数と出力トルクの制御法について検討する。前述の (10) 式は一次電圧ベクトル v_1 の時間積分が一次磁束鎖交数ベクトル ψ_1 になることを表しているの、ほぼ出力された電圧ベクトルの方向へ ψ_1 が移動するものと考えられる。図2はこの様子を示しており、これより ψ_1 の絶対値 (振幅) 制御には v_1 の γ 軸成分 $v_{1\gamma}$ が寄与し、 ψ_1 の角周波数制御には δ 軸成分 $v_{1\delta}$ が寄与することがわかる。したがって、磁束については磁束指令 $|\psi_1^*|$ と (11) 式で求めた $|\psi_1|$ の誤差が収束するように $v_{1\gamma}$ を出力し、トルクについてはトルク指令 T^* と (12) 式で求めた T の誤差が収束するように $v_{1\delta}$ を出力すればよい。以上のように本システムでは磁束と出力トルクのフィードバックループを構成してそれらの直接的な制御を行う。

図3は磁束一定制御下でステップ状の定格トルク指令を与えた場合のシミュレーション結果である。このように過渡時においても良好な磁束一定特性と極めて高速なトルク応答 (1~2ms) が実現されている。特に二次抵抗 R_2 が 50%~150% の範囲で大幅に変動しても、トルク制御にはほとんど影響が現れていない。

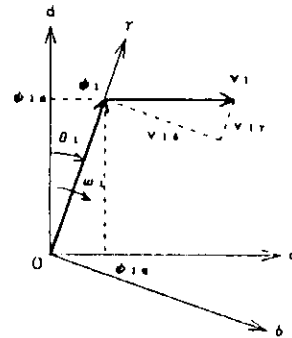


図2 一次磁束鎖交数と一次電圧の関係
Fig.2 Relationship between Primary Flux Linkage and Primary Voltage

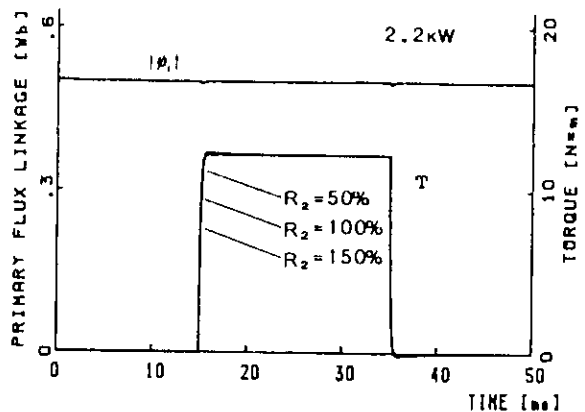


図3 磁束およびトルク制御特性
Fig.3 Characteristics of Flux and Torque Control

5. 速度センサレス制御システムの構成と運転特性

図4は以上の制御系に図1の同定機構を組み込んだ速度センサレス制御システムである。図中の $\gamma\delta$ 変換はd q座標から $\gamma\delta$ 座標への変換を表しており、図2の関係から次式で演算することができる。

$$\begin{bmatrix} i_{1\gamma} \\ i_{1\delta} \end{bmatrix} = \frac{1}{|\psi_{1\delta}|} \begin{bmatrix} \psi_{1\delta} & \psi_{1\alpha} \\ -\psi_{1\alpha} & \psi_{1\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} \quad (13)$$

同様にd q変換は $\gamma\delta$ 座標からd q座標への変換を表しており、(13)式の逆行列を用いて演算することができる。また(8)式の演算に必要な ω_1 は(4)式と(6)式を(3)式の第4行へ代人することにより次のように簡単に求められる。

$$\omega_1 = \frac{v_{1\delta} - R_1 i_{1\delta}}{|\psi_{1\delta}|} \quad (14)$$

なお実際のシステムではd q座標における電圧指令をパルス幅変調して電圧形インバータに与える。

図5はこのシステムで急加減速運転を行った場合のシミュレーション結果であり、安定な運転特性が得られていることがわかる。

6. まとめ

本論文では一次磁束鎖交数に着目したすべり角周波数の同定法とそれを用いた新しい速度センサレス制御法を提案した。その結果、二次抵抗変動の影響を受けずに磁束一定制御と高速なトルク制御が可能であること、速度センサレス制御に関しては良好な急加減速運転が可能であることがデジタルシミュレーションによって確認された。今後は同定機構の安定性やパラメータ変動の補償について検討を加えるとともに、デジタルシグナルプロセッサ等を使用した実機による検証も行っていく所存である。

7. 参考文献

- (1) 奥山、藤本、松井、久保田 「誘導電動機 の速度・電圧センサレスベクトル制御法」 電学論D、107、191(昭62-2)
- (2) 大谷、渡辺、高崎、高田 「ベクトル制御における誘導電動機 の速度センサレスドライブ」 電学論D、107、199(昭62-2)
- (3) 杉本、玉井、矢野 「モデル規範適応システムを適用した誘導電動機 の速度センサレスベクトル制御」 電学論D、108、306(昭63-3)
- (4) 久保田、尾崎、松瀬、中野 「適応二次磁束オブザーバを用いた誘導電動機 の速度センサレス直接形ベクトル制御」 電学論D、111、954(平3-11)
- (5) 山村、岩崎、桜井、常広 「定数推定機能を付加した誘導機 のPGレスベクトル制御法」 電学論D、111、373(平3-5)
- (6) 大森、宮下 「速度センサレス瞬時空間ベクトル制御」 電学産業応用研究会資料、IEA-90-33(平2-10)

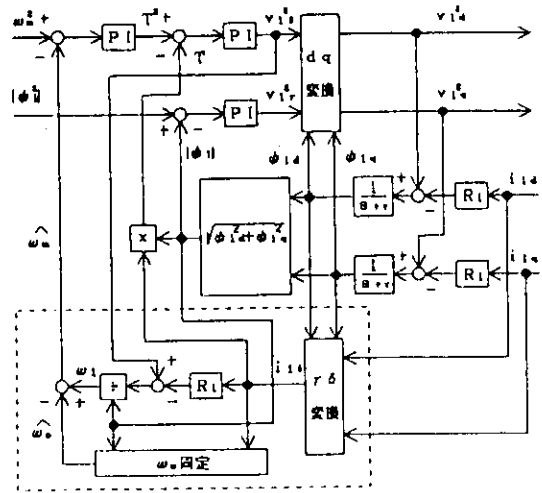


図4 制御システムの構成
Fig.4 Configuration of Control System

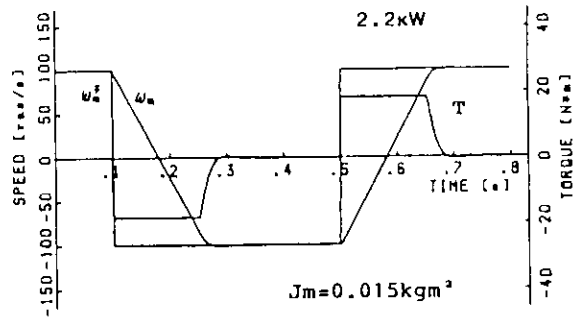


図5 急加減速運転特性
Fig.5 Characteristics of Rapid Acceleration and Deceleration