適応二次磁束オブザーバの誘導電動機速度推定への応用

正 員 久保田 寿 夫 (明 治 大)
正 員 松 瀬 貢 規 (明 治 大)
正 員 中 野 孝 良 (富士電機総研)

Application of Adaptive Flux Observer to Speed Estimation of Induction Motor

Hisao Kubota, Member, Kouki Matsuse, Member (Meiji University), Takayoshi Nakano,
Member (Fuji Electric Co. Research and Development)

キーワード：適応オブザーバ，誘導電動機，速度推定，リアプノフの安定法

1. ま え が き

誘導電動機の高精度制御法であるベクトル制御を，速度センサを付加できない用途に対して適用する要求が増えている。速度センサレスのベクトル制御方式も幾つか報告されているが⁽¹⁾，速度推定に関する安定性の考察は不十分であり，低速域での演算精度に問題がある。これらの問題を解決するために，二次磁束スライディングオブザーバに速度の適応機構を加えて速度推定を行う方法が提案されている⁽²⁾。しかし，この方法ではスライディング動作によるチャタリングのため適応動作をあまり高速で行えないことが予想される。

著者らは，電動機パラメータを適応同定するフルオーダー二次磁束オブザーバを提案した⁽³⁾。本報告では，その適応機構を速度推定に対して応用し，この安定性をリアプノフ法により証明すると共に，シミュレーションにより安定な速度推定法であることを示す。

2. 誘導電動機の二次磁束オブザーバ

誘導電動機は固定座標上で複素数表現により次のように記述できる⁽⁴⁾。

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_s \\ \dot{\hat{\phi}}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\phi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \\ = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}v_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし，

$$\begin{aligned} i_s &= i_{ds} + j i_{qs} : \text{一次電流} \\ \phi_r &= \phi_{dr} + j \phi_{qr} : \text{二次磁束} \\ v_s &= v_{ds} + j v_{qs} : \text{一次電圧} \\ a_{11} &= -\{R_s/(\sigma L_s) + (1-\sigma)/(\sigma \tau_r)\} \\ a_{12} &= M/(\sigma L_s L_r) \{ (1/\tau_r) - j \omega_r \} \\ a_{21} &= M/\tau_r, \quad a_{22} = -(1/\tau_r) + j \omega_r, \quad b_1 = 1/(\sigma L_s) \end{aligned}$$

$$\sigma = 1 - M^2/(L_s L_r), \quad \tau_r = L_r/R_r$$

フルオーダー二次磁束オブザーバは次のようになる。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} + \Delta \mathbf{A}) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}v_s + \mathbf{g}(\hat{i}_s - i_s) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし， $\hat{\mathbf{x}}$ は推定値を表し， $\Delta \mathbf{A}$ は速度推定誤差による誤差分の行列である。また，オブザーバの極は誘導電動機固有の極の k 倍に比例させる⁽³⁾。

3. 速度の適応調整則と安定性の証明

電動機角速度 ω_r の推定値 $\hat{\omega}_r$ を次のように演算する。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\omega}}_r &= K_P(e_{id}\hat{\phi}_{qr} - e_{iq}\hat{\phi}_{dr}) \\ &\quad + K_I \int (e_{id}\hat{\phi}_{qr} - e_{iq}\hat{\phi}_{dr}) dt \\ &= \hat{\omega}_{rP} + \hat{\omega}_{rI} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\text{ただし, } e_{id} = \hat{i}_{sd} - \hat{i}_{sd}, \quad e_{iq} = \hat{i}_{sq} - \hat{i}_{sq}, \quad K_P, \quad K_I : \text{正の定数}$$

適応オブザーバの安定性をリアプノフ法により証明する。なお，簡単のため $\mathbf{g} = 0$ とする。状態変数の推定誤差を $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ とし，リアプノフ関数の候補を次のように選ぶ。

$$V = \mathbf{e}^* \mathbf{e} + (\hat{\omega}_{rI} - \omega_r)^2 / (c K_I) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし, } c = (\sigma L_s L_r) / M$$

(4) 式の時間微分は次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{e}^* (\mathbf{A}^* + \mathbf{A}) \mathbf{e} - 2K_P(e_{id}\hat{\phi}_{rq} - e_{iq}\hat{\phi}_{rd})^2 / c \\ &\quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

従って， $\dot{V}$ の負定性が言え，安定性が証明できたことになる。適応則として一般には(3)式の積分項のみを使用するが，電動機速度の速い変化に追従するためには比例項を追加している。比例項により $\dot{V}$ の値が(5)式第2項の分だけ負側に強められている。 $\mathbf{g} \neq 0$ の場合についても同様な手順で証明できる。

図 1 速度センサレス直接形ベクトル制御系
Fig.1. Field oriented controller without speed sensor.

図 2 速度適応二次磁束オブザーバ
Fig.2. Speed adaptive flux observer.

図 3 速度ステップ応答 ($k=1$, $K_P=40$, $K_I=1,800$)
Fig.3. Step response of speed.

図 4 負荷トルクのステップ応答
Fig.4. Step response of load torque.

4. 速度センサレス直接形ベクトル制御のシミュレーション結果とその考察

上述の適応オブザーバにより推定された速度および二次磁束を用いた誘導電動機の直接形センサレスベクトル制御系の構成を図 1 に、速度適応二次磁束オブザーバの構成図を図 2 に示す。図 3 に速度ステップ応答のシミュレーション結果を示す。なお、誘導電動機は 4 極、3.7 kW である。図には実速度を示しているが、制御系ではこの情報を用いてない。図 4 は負荷トルクのステップ変化に対する応答である。力行時、回生時（負の負荷トルク）とも、実速度と推定速度が重なっており、速度推定が良好に行われた。

5. ま と め

適応オブザーバ理論に基づく、新しい誘導電動機の速度推定法を提案し、この安定性をリアプノフ法により証明した。最後に、協力していただいた本学 尾崎正則君に謝意を表する。（平成 2 年 8 月 13 日受付）

文 献

- (1) 大谷，他：電学論 D, 107, 199 (昭 62-2)
- (2) 道木，他：平 2 電気学会全大, No. 595
- (3) 久保田，他：平 2 同上, No. 598
- (4) 堀，他：平元電気学会産業応用部門全大, No. 158

久保田 寿夫 (正員)

昭和 59 年明治大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学工学部助手，平成元年同理工学部助手。工学博士。IEEE 会員。

松瀬 貢規 (正員)

昭和 46 年明治大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学工学部専任講師，助教授を経て，54 年同教授，平成元年同理工学部教授。

工学博士。55 年 3 月～7 月アメリカ・アイオワ州立大学客員教授。IEEE 会員。

中野 孝良 (正員)

昭和 35 年早稲田大学第 1 理工学部電気工学科卒業。同年富士電機製造(株)〔現、富士電機(株)〕入社。現在，富士電機総合研究所電子機器開

発本部勤務。