

誘導電動機速度センサレスベクトル制御系の鉄損考慮時の安定性解析

永野 孝*・篠原 勝次**・有馬 裕樹***

A Stability Analysis of the Vector Control System of an Induction Motor without a Speed Sensor Taking into Account a Core Loss

Takashi NAGANO, Katsuji SHINOHARA, Hiroki ARIMA

The rotor flux is constant and a core loss is ignored in the conventional vector control system of an induction motor. We present a report on the stability analysis of vector control of an induction motor without a speed sensor that ignores the core loss. But the vector control system has the problems that its efficiency is lower with a light load and that its control accuracy is lower at high speed due to the core loss.

In this paper, we derive the non-linear equations for the stability analysis of the vector control system of an induction motor taking into account the core loss with a speed sensor and without a speed sensor.

1. まえがき

誘導電動機のベクトル制御では、一般に電動機の二次磁束を一定とし鉄損は無視し解析される。筆者らも誘導電動機速度センサレスベクトル制御の安定性解析¹⁾において、電動機の鉄損は微小であるため無視し解析してきた。しかし、誘導電動機のベクトル制御では鉄損による軽負荷時における効率低下の問題点²⁾、高速回転時における制御精度の問題点³⁾⁴⁾が指摘されている。

本稿では、鉄損を考慮した誘導電動機のT形等価回路から電圧方程式を導出し、次に誘導電動機速度センサ付きベクトル制御系と速度センサレスベクトル制御系における鉄損を考慮した安定性解析のためにそれぞれの制御系の非線形連立微分方程式を導出したので報告する。

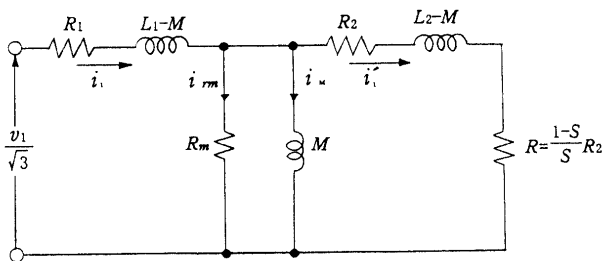


図1 等価回路

2. 等価回路

図1に鉄損を考慮した場合の誘導電動機の等価回路を示す。一般的な鉄損を無視した誘導電動機のT形等価回路に励磁インダクタンス M と並列に鉄損抵抗 R_m を挿入している。ここで、 i_m は鉄損電流、 i_M は磁化電流を表す。

3. 速度センサ付きベクトル制御系の解析モデル

図2に速度センサ付きベクトル制御系の解析モデルを示す。まず速度指令 ω_r^* と速度 ω_r の偏差をPI制御することで、トルク電流指令 i_{1q}^* を作る。

次にトルク電流指令 i_{1q}^* からベクトル制御の原理に従って滑り角速度指令 ω_s^* を作り検出してきた角速度と滑り角速度指令 ω_s^* を加算して回転磁界の角速度 ω_ϕ を作る。ここで磁束一定制御を行っているため磁束電流指令 i_{1d}^* は一定としている。

4. 非線形連立微分方程式の導出

鉄損を考慮した誘導電動機の同期速度で回転するd-q座標系の電圧方程式⁵⁾、機械系の式、速度制御部の式、3相電流PI制御回路の式より以下の12元の非線形連立微分方程式が導出される。

$$\begin{aligned}
 p i_{1d} = & (1/G) [\{ -(R_1 + \alpha)(L_2 - \beta) + s\alpha\gamma \} i_{1d} \\
 & + \{ \omega_\phi(L_1 - \beta)(L_2 - \beta) - s\omega_\phi\gamma^2 \} i_{1q} \\
 & + \{ -(L_2 - \beta)\alpha + (R_2 + s\alpha)\gamma \} i_{2d} \\
 & + \{ (L_2 - \beta)\omega_\phi\gamma - s\omega_\phi(L_2 - \beta)\gamma \} i_{2q} \\
 & + (L_2 - \beta)K_v \{ K_{pi}(i_{1d}^* - i_{1d}) - A_d \}] \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

平成10年 5月31日受理

*博士後期課程システム情報工学専攻

**電気電子工学科

***博士前期課程電気電子工学専攻

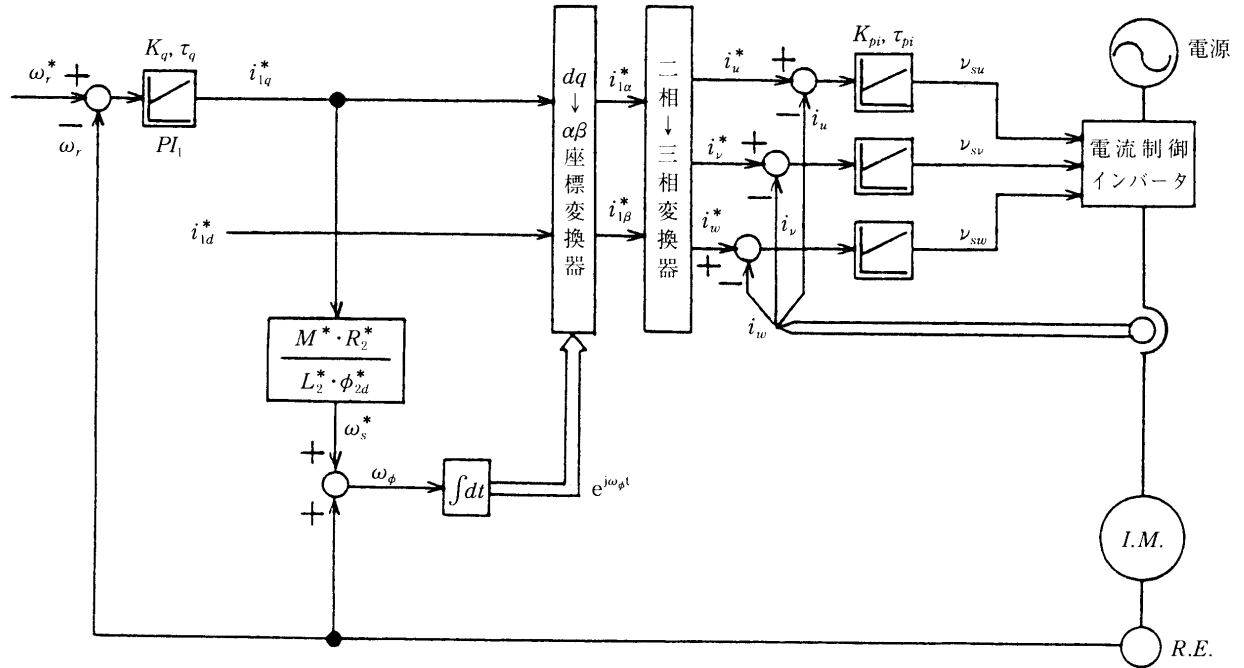


図2 速度センサ付きベクトル制御系解析モデル

$$\begin{aligned}
 pi_{1q} = & (1/G) [\{-\omega_\phi(L_1-\beta)(L_2-\beta) + s\omega_\phi\gamma^2\} i_{1d} \\
 & + \{-(R_1+\alpha)(L_2-\beta) + s\alpha\gamma\} i_{1q} \\
 & + \{-\omega_\phi\gamma(L_2-\beta) + s\omega_\phi(L_2-\beta)\gamma\} i_{2d} \\
 & + \{-\alpha(L_2-\beta) + (R_2+s\alpha)\gamma\} i_{2q} \\
 & + (L_2-\beta)K_p\{K_{pi}(i_{1q}^* - i_{1q}) - A_q\}] \dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 pi_{2d} = & (1/G) [\{(R_1+\alpha)\gamma - s\alpha(L_1-\beta)\} i_{1d} \\
 & + \{-\omega_\phi(L_1-\beta)\gamma + s\omega_\phi\gamma(L_1-\beta)\} i_{1q} \\
 & + \{\alpha\gamma - (R_2+s\alpha)(L_1-\beta)\} i_{2d} \\
 & + \{-\omega_\phi\gamma^2 + s\omega_\phi(L_1-\beta)(L_2-\beta)\} i_{2q} \\
 & - \gamma K_v\{K_{pi}(i_{1d}^* - i_{1d}) - A_d\}] \dots\dots\dots(3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 pi_{2q} = & (1/G) [\{\omega_\phi(L_1-\beta)\gamma - s\omega_\phi\gamma(L_1-\beta)\} i_{1d} \\
 & + \{(R_1+\alpha)\gamma - s\alpha(L_1-\beta)\} i_{1q} \\
 & + \{\omega_\phi\gamma^2 - s\omega_\phi(L_1-\beta)(L_2-\beta)\} i_{2d} \\
 & + \{\alpha\gamma - (R_2+s\alpha)(L_1-\beta)\} i_{2q} \\
 & - \gamma K_v\{K_{pi}(i_{1q}^* - i_{1q}) - A_q\}] \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

$$pi\omega_r = (1/J) \{ (P/2)(i_{1q}i_{2d} - i_{1d}i_{2q}) - \tau_l \} \dots\dots\dots(5)$$

$$pi i_{1q}^* = (P/2) \{ (K_q/\tau_q)(\omega_r^* - \omega_r) + K_q p(\omega_r^* - \omega_r) \} \dots\dots(6)$$

$$pi A_d = -(K_{pi}/\tau_{pi})(i_{1d}^* - i_{1d}) - B_d \dots\dots\dots(7)$$

$$pi A_q = -(K_{pi}/\tau_{pi})(i_{1q}^* - i_{1q}) - B_q \dots\dots\dots(8)$$

$$pi B_d = (K_{pi}/\tau_{pi}) \{ \omega_\phi(i_{1q}^* - i_{1q}) + p\omega_\phi C_d \} + \omega_\phi^2 A_d \dots\dots\dots(9)$$

$$pi B_q = -(K_{pi}/\tau_{pi}) \{ \omega_\phi(i_{1d}^* - i_{1d}) + p\omega_\phi C_d \} + \omega_\phi^2 A_q \dots\dots\dots(10)$$

$$pi C_d = -(i_{1d}^* - i_{1d}) - \omega_\phi C_q \dots\dots\dots(11)$$

$$pi C_q = (i_{1q}^* - i_{1q}) + \omega_\phi C_d \dots\dots\dots(12)$$

$$G = (L_1 - \beta)(L_2 - \beta) - \gamma^2$$

$$\alpha = \frac{R_m(\omega_\phi M)^2}{R_m^2 + (\omega_\phi M)^2} \quad \beta = \frac{\omega_\phi^2 M^3}{R_m^2 + (\omega_\phi M)^2}$$

$$\gamma = \frac{R_m^2 M}{R_m^2 + (\omega_\phi M)^2}$$

$$\omega_\phi = \frac{P}{2} \omega_r + \frac{M^* R_2^*}{L_2^* \phi_{2d}^*} i_{1q}^*$$

$$\omega_s = \frac{M^* R_2^*}{L_2^* \phi_{2d}^*} i_{1q}^* \quad s = \frac{\omega_s}{\omega_\phi}$$

5. 速度センサレスベクトル制御系の解析モデル

図3に速度センサレスベクトル制御系の解析モデルを示す。回転子速度推定値 $\hat{\omega}_r$ はトルク電流指令 i_{1q}^* と \hat{i}_{1q} の偏差を入力とするPI演算により求められ、滑り周波数指令 ω_s^* と加算されて回転磁界の角速度 ω_ϕ となる。

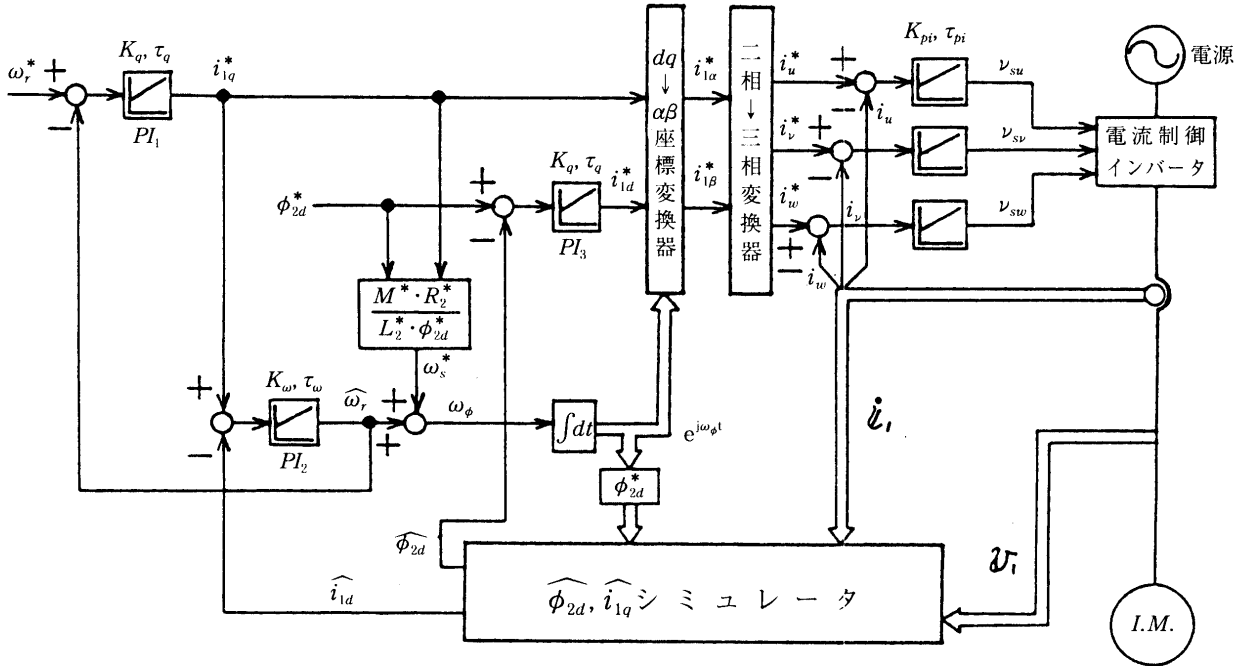


図3 速度センサレスベクトル制御系解析モデル

i_{1q}^* は回転子速度指令 ω_r^* と $\hat{\omega}_r$ の偏差を入力とする P I 演算により求められ、磁束電流指令 i_{1d}^* とともに dq-3 相変換して一次電流指令を作る。次に一次電流指令 i_u^* , i_v^* , i_w^* と検出してきた一次電流 i_u , i_v , i_w との偏差を P I 制御することで一次電圧指令 v_{su} , v_{sv} , v_{sw} を作る。磁束とトルクに寄与する電流との非干渉化を行うために、シミュレータ内部に於いて電動機相電流と相電圧からトルク成分電流演算値 \hat{i}_{1q} と二次磁束演算値 $\hat{\phi}_{2d}$ を求めている。

6. 非線形連立微分方程式の導出

鉄損を考慮した誘導電動機の電圧方程式、機械系の式、シミュレータの式、3相電流 P I 制御回路の式より以下の16元の式が導出される。

$$\begin{aligned}
 pi_{1d} = & (1/G) [\{ -(R_1 + \alpha)(L_2 - \beta) + \alpha\gamma \} i_{1d} \\
 & + \{ \omega_\phi(L_1 - \beta)(L_2 - \beta) - s\omega_\phi\gamma^2 \} i_{1q} \\
 & + \{ -(L_2 - \beta)\alpha + (R_2 + \alpha\gamma) \} i_{2d} \\
 & + \{ (L_2 - \beta)\omega_\phi\gamma - s\omega_\phi(L_2 - \beta)\gamma \} i_{2q} \\
 & + (L_2 - \beta)K_v \{ K_{pi}(i_{1d}^* - i_{1d}) - A_d \}] \dots\dots\dots(13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 pi_{1q} = & (1/G) [\{ -\omega_\phi(L_1 - \beta)(L_2 - \beta) + s\omega_\phi\gamma^2 \} i_{1d} \\
 & + \{ -(R_1 + \alpha)(L_2 - \beta) + \alpha\gamma \} i_{1q} \\
 & + \{ -\omega_\phi\gamma(L_2 - \beta) + s\omega_\phi(L_2 - \beta)\gamma \} i_{2d} \\
 & + \{ -\alpha(L_2 - \beta) + (R_2 + \alpha\gamma) \} i_{2q} \\
 & + (L_2 - \beta)K_v \{ K_{pi}(i_{1q}^* - i_{1q}) - A_q \}] \dots\dots\dots(14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 pi_{2d} = & (1/G) [\{ (R_1 + \alpha)\gamma - \alpha(L_1 - \beta) \} i_{1d} \\
 & + \{ -\omega_\phi(L_1 - \beta)\gamma + s\omega_\phi\gamma(L_1 - \beta) \} i_{1q} \\
 & + \{ \alpha\gamma - (R_2 + \alpha)(L_1 - \beta) \} i_{2d} \\
 & + \{ -\omega_\phi\gamma^2 + s\omega_\phi(L_1 - \beta)(L_2 - \beta) \} i_{2q} \\
 & - \gamma K_v \{ K_{pi}(i_{1d}^* - i_{1d}) - A_d \}] \dots\dots\dots(15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 pi_{2q} = & (1/G) [\{ \omega_\phi(L_1 - \beta)\gamma - s\omega_\phi\gamma(L_1 - \beta) \} i_{1d} \\
 & + \{ (R_1 + \alpha)\gamma - \alpha(L_1 - \beta) \} i_{1q} \\
 & + \{ \omega_\phi\gamma^2 - s\omega_\phi(L_1 - \beta)(L_2 - \beta) \} i_{2d} \\
 & + \{ \alpha\gamma - (R_2 + \alpha)(L_1 - \beta) \} i_{2q} \\
 & - \gamma K_v \{ K_{pi}(i_{1q}^* - i_{1q}) - A_q \}] \dots\dots\dots(16)
 \end{aligned}$$

$$p\omega_r = (1/J) \{ (P/2)(i_{1q}i_{2d} - i_{1d}i_{2q}) - \tau_l \} \dots\dots\dots(17)$$

$$p\phi_{2d}^c = (1/T_c) \{ \phi_{2d}^* + T_c(v_{1d} - R_1^*i_{1d} - lp_i i_{1d} + \omega_\phi li_{1q}) + \omega_\phi\phi_{2d}^c - \phi_{2d}^c \} \dots\dots\dots(18)$$

$$p\phi_{2q}^c = (1/T_c) \{ T_c(v_{1q} - R_1^*i_{1q} - lp_i i_{1q} - \omega_\phi li_{1d}) - \omega_\phi\phi_{2d}^c - \phi_{2q}^c \} \dots\dots\dots(19)$$

$$\begin{aligned}
 p\hat{\omega}_r = & \{ 1/(1 + K_\omega K_q) \} [-K_\omega p\hat{i}_{1q} + (K_\omega/\tau_\omega)(i_{1q}^* - \hat{i}_{1q}) \\
 & + K_\omega K_q (P/2)p\omega_r^* + (K_\omega K_q/\tau_q) \\
 & \{ (P/2)\omega_r^* - \hat{\omega}_r \}] \dots\dots\dots(20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 pi_{1q}^* = & \{ 1/(1 + K_\omega K_q) \} [K_\omega K_q p\hat{i}_{1q} - (K_\omega K_q/\tau_\omega) \\
 & (i_{1q}^* - \hat{i}_{1q}) + K_q (P/2)p\omega_r^* + (K_q/\tau_q) \\
 & \{ (P/2)\omega_r^* - \hat{\omega}_r \}] \dots\dots\dots(21)
 \end{aligned}$$

$$p i_{1d}^* = K_d (p \phi_{2d}^* + \phi_{2d}^* / \tau_d - p \widehat{\phi}_{2d} - \widehat{\phi}_{2d} / \tau_d) \dots\dots\dots(22)$$

$$p A_d = - (K_{pi} / \tau_{pi}) (i_{1d}^* - i_{1d}) - B_d \dots\dots\dots(23)$$

$$p A_q = - (K_{pi} / \tau_{pi}) (i_{1q}^* - i_{1q}) - B_q \dots\dots\dots(24)$$

$$p B_d = (K_{pi} / \tau_{pi}) \{ \omega_\phi (i_{1q}^* - i_{1q}) + p \omega_\phi C_d \} + \omega_\phi^2 A_d \dots\dots\dots(25)$$

$$p B_q = - (K_{pi} / \tau_{pi}) \{ \omega_\phi (i_{1d}^* - i_{1d}) + p \omega_\phi C_d \} + \omega_\phi^2 A_q \dots\dots\dots(26)$$

$$p C_d = - (i_{1d}^* - i_{1d}) - \omega_\phi C_d \dots\dots\dots(27)$$

$$p C_q = (i_{1q}^* - i_{1q}) + \omega_\phi C_d \dots\dots\dots(28)$$

$$G = (L_1 - \beta)(L_2 - \beta) - \gamma^2$$

$$\alpha = \frac{R_m (\omega_\phi M)^2}{R_m^2 + (\omega_\phi M)^2} \quad \beta = \frac{\omega_\phi^2 M^3}{R_m^2 + (\omega_\phi M)^2}$$

$$\gamma = \frac{R_m^2 M}{R_m^2 + (\omega_\phi M)^2}$$

$$\omega_\phi = \widehat{\omega}_r + \frac{M^* R_2^*}{L_2^* \phi_{2d}^*} i_{1q}^*$$

$$\omega_s = \omega_\phi - \frac{P}{2} \omega_r \quad s = \frac{\omega_s}{\omega_\phi}$$

7. まとめ

3相P I電流制御ループを用いた速度センサ付きベクトル制御系と速度センサレスベクトル制御系において誘導電動機の鉄損を考慮した非線形連立微分方程式を導出した。今後は、非線形連立微分方程式を微小変位理論を用いて線形化し安定性について検討する予定である。

参考文献

- 1) 篠原, 永野, 大山: 電学論 D, 116, 337(平8-3)
- 2) 黄, 田所, 塚越, 松瀬: 電学論 D, 115, 39(平7-1)
- 3) 水野, 高山, 市岡, 寺島: 電学論 D, 109, 841(平元-11)
- 4) 谷口, 吉住, 松瀬: 平10電気学会全大 No. 900
- 5) 野中, 篠原, 山川, 平川: 九大工学集報 52, 1, 39 (昭54-1)