

# 永久磁石型同期電動機の高回転位置センサレス制御の安定性に関する研究

吉野 賢人\* 花本 剛士\*  
(\*九州工業大学大学院)

## 1 はじめに

永久磁石同期電動機(PMSM)は回転子位置に応じて電圧と電圧を制御する必要があり、回転子の位置検出器が必要である。しかし、位置検出器を使うことで大型化、高コスト化などの問題がありセンサレス制御が望まれている。センサレス制御手法の一つとして、オブザーバを用いて誘起電圧を推定し、そこから速度と位置情報を得る方法がある。本研究では高速回転時でも位相遅れを生じずに誘起電圧を推定できる正弦波モデル式を用いてオブザーバを構築した。[1]実験機器には定格回転数  $15000 \text{ min}^{-1}$ 、定格トルク  $0.12 \text{ Nm}$ 、極対数 2 の PMSM を用いた。オブザーバの極の安定性について考察し、高速回転時の速度応答と外乱応答を確認し良好な結果が得られたため報告する。

## 2 原理

### 2.1 正弦波誘起電圧オブザーバ

PMSM の  $\alpha\beta$  座標上での電圧方程式を(1)式に示す。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $v$ : 電機子電圧、 $i$ : 電機子電流、 $e$ : 誘起電圧、 $R_a$ : 電機子抵抗、 $L_a$ : 電機子インダクタンス、 $\theta_e$ : 電気角、 $\omega_e$ : 電気角速度、添字  $\alpha\beta$  は  $\alpha$  軸、 $\beta$  軸成分を表す。

本研究では、正弦波モデル式を用いてオブザーバを構築した。 $\beta$  相は  $\alpha$  相に対して  $90^\circ$  遅れているので正弦波モデル式を以下のように表すことができる。

$$\begin{cases} e_\alpha = A \sin \theta + B \cos \theta \\ e_\beta = -A \cos \theta + B \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

$A, B$  を定数と仮定する。上記関係式を適用したオブザーバは以下のように表される。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\beta \\ \hat{e}_\beta \\ \hat{e}_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\omega}_e \\ 0 & -\hat{\omega}_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\beta \\ \hat{e}_\beta \\ \hat{e}_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_\beta + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} (i_\beta - \hat{i}_\beta) \\ i_\beta = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{i}_\beta \\ \hat{e}_\beta \\ \hat{e}_\alpha \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

電気角は以下のように算出される。

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1}(-\hat{e}_\alpha / \hat{e}_\beta) \quad (4)$$

電気角速度は以下のように算出される。

$$\hat{\omega}_e = \frac{d}{dt} \hat{\theta}_e \quad (5)$$

オブザーバと実際のシステムとの誤差方程式は以下のように表すことができる。

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (\mathbf{A}_c - \mathbf{k}_c \mathbf{c}_c) \mathbf{e}(t) \quad (6)$$

## 3 実験

### 3.1 極の安定解析

正弦波誘起電圧オブザーバは電気角速度によって  $A_c$  の値が変化する。そのため安定領域内で定めた極から求めたオブザーバゲインが全ての回転速度で安定とは限らない。そのため、オブザーバの極の安定解析が必要である。式(6)

の特性方程式の極を  $p_1, p_2, p_3$  とおく。電気角速度  $1570.8 \text{ rad/s}$  のとき、 $p_1, p_2, p_3$  を  $3141.6 \text{ rad/s}$  とおきオブザーバゲイン  $k_1, k_2, k_3$  を算出した。この時、回転速度を  $1$  から  $15000 \text{ min}^{-1}$  まで  $1000 \text{ min}^{-1}$  ずつ変化させた場合の離散系の極の軌跡を図 1 に示す。

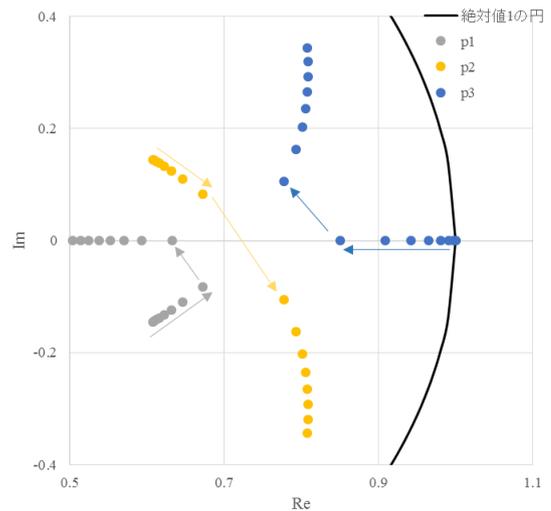


図 1 オブザーバの極の安定解析

### 3.2 実機実験結果

$t=0\text{s}$  で回転速度  $12000$  から  $15000 \text{ min}^{-1}$  のステップ応答、 $t=4\text{s}$  で定格トルク  $40\%$  の負荷を加えた波形を図 2 に示す。

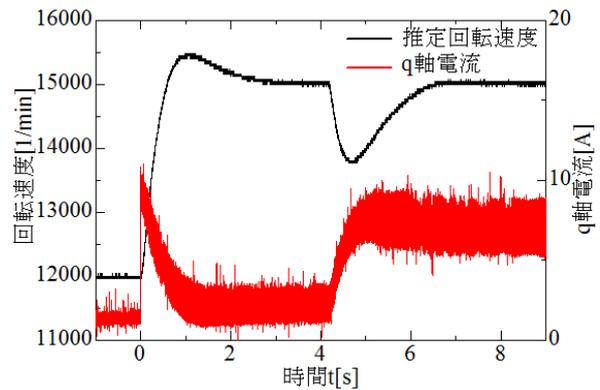


図 2 速度負荷応答

## 4 まとめ

提案する正弦波誘起電圧オブザーバの極の安定解析により、全ての回転速度で極が安定領域内に収まっていることがわかる。また、図 2 より高速回転時のセンサレス制御が実現できていることがわかる。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 16K06229 の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] 土谷厚司・花本 剛士・吉野 賢人 共著 永久磁石型同期電動機の高回転位置センサレス制御法に関する研究 電気学会