

# 外乱オブザーバによるデッドタイム誤差補償法を用いた誘導機駆動システムの安定解析

星野 哲馬\*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Stability Analysis for Induction-Motor Drive System with Disturbance Observers for Dead-time Error Correction  
Tetsuma Hoshino, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

モータドライブシステムではインバータのデッドタイムによる出力電圧の誤差が大幅な制御性能の劣化の原因となる<sup>(1)</sup>。特に、一般産業でよく用いられる誘導機の  $V/f$  制御はオープンループ制御であるため、制御性能の劣化が著しい。著者らは外乱オブザーバによるデッドタイム誤差電圧補償法を提案し、 $V/f$  制御に適用して良好な結果を得ている<sup>(2)</sup>。

本論文では、提案する補償法を用いた誘導機駆動システムに対し、根軌跡を用いて制御器の設定値が安定性に及ぼす影響を検討した。その結果、安定化の条件が得られたので報告する。

## 2. 外乱オブザーバによる誤差補償法

デッドタイム誤差電圧に対しては一定の平均誤差電圧をフィードフォワード補償するのが一般的である (従来法)。しかし、従来法では電流ゼロクロス時に極性判別が難しく特に極低速での補償が困難となる欠点があった。

そこで、著者らの提案する電流値の情報を用いる外乱オブザーバによるデッドタイム誤差電圧補償を適用する。

回転座標変換の  $d$  軸方向が二次磁束ベクトルと一致していると仮定すれば、 $q$  軸の一次電圧  $v_q$  は(1)式となる。

$$v_q = (R_s + R_{20} + pL_\sigma) i_q - \omega_{dq} L_\sigma i_d + \omega_{re} \phi_{2d} \dots\dots\dots(1)$$

ただし  $v_q$ :  $q$  軸一次電圧,  $i_q$ :  $q$  軸一次電流,  $i_d$ :  $d$  軸一次電流,  $\phi_{2d}$ : 二次磁束,  $R_s$ : 一次抵抗,  $R_{20}$ : 二次抵抗,  $p$ : 微分演算子,  $L_\sigma$ : 漏れインダクタンス,  $L_m$ : 励磁インダクタンス,  $\omega_{dq}$ : 一次周波数,  $\omega_{re}$ : 二次側回転周波数を表す。

外乱オブザーバは誘導機から得た電流情報から一次電圧  $v_q$  を式(1)の逆関数を用いて推定し、指令電圧と比較してデッドタイム誤差電圧を推定、補償する。

図 1 に提案する誤差電圧補償法を誘導電動機に適用したブロック図を示す。図中の  $\Delta V$  は誤差電圧、外乱オブザーバ部の  $T_f, T_s$  は帰還フィルタの時定数、 $d$  軸電流制御器の  $K_{ACR}$  は比例ゲインである。高速の時定数  $T_f$  を用いたフィルタは  $\Delta V$  以外に逆起電力項も外乱として推定する。この逆起電力項の補償を行うと中高速で不具合が生じるため、低速の時定数  $T_s$  を用いたフィルタで逆起電力項を推定し打ち消す。また  $d$  軸の電流制御器は  $d$  軸電圧に発生するデッドタイム誤差電圧を補償するとともに、励磁電流を確保する。

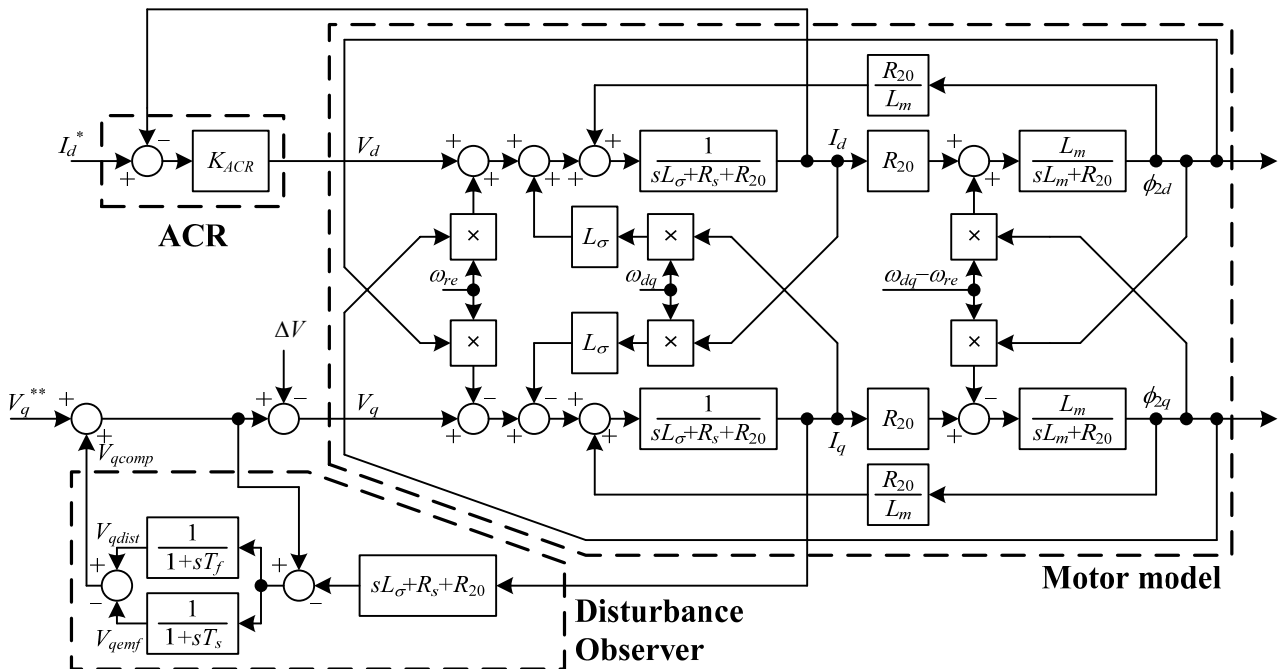
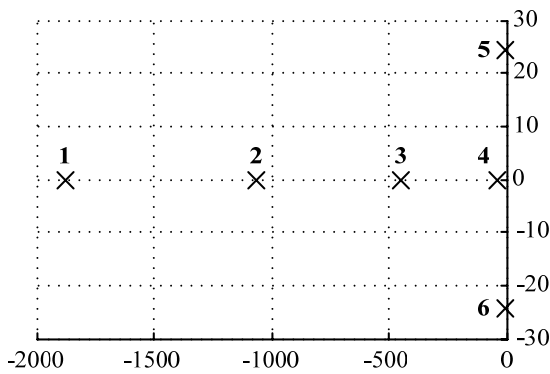
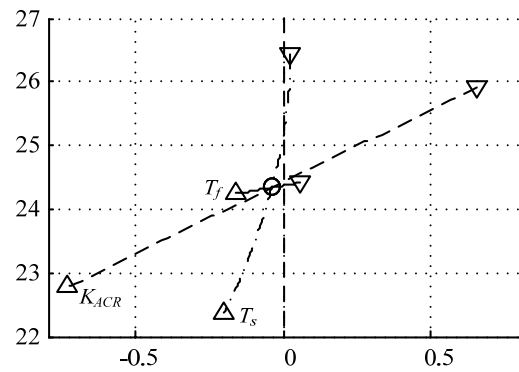


図 1 誘導電動機に外乱オブザーバによるデッドタイム誤差補償法を適用したシステム  
Fig. 1. Induction-Motor Drive System with Dead-time Error Correction Method with Disturbance Observers



(a) 6 roots placement



(b) Trackings of most vibratile root No.5

Fig. 2. Placement and tracking of roots. ○ shows no parameter variations. △ shows +20% ▽ shows -20%.

Each solid line, dash-dot line and dashed line means  $K_{ADC}$  flux retainer gain,  $T_f$  and  $T_s$  observer time-constant variations.

図2 根配置と軌跡

### 3. システムの安定性解析

図1で提案するシステムに対して状態方程式の根配置・軌跡から安定性の解析を行った。解析は750W汎用誘導電動機のモータパラメータを用い、速度一定の条件で行った。なお、解析の簡略化のためインバータを理想電源とし、制御系は連続系で定義した。

図2(a)に $T_f=1\text{ms}$ ,  $T_s=100\text{ms}$ ,  $K_{ACR}=0.5$ としたときの安定限界時の速度 $\omega_{dq}=\omega_{re}=0.65\text{PU}$ における根配置を示す。本システムは6次のシステムのため6つの極を持つが、うち図中のNo.1~4は負の実数で安定な根である。残るNo.5, 6の根は共役の虚部を含むため振動的で、最も右半平面に近い場合不安定となりうる。

図2(b)にNo.5の根に対してコントローラのd軸比例ゲイン $K_{ACR}$ と帰還フィルタの時定数 $T_f$ ,  $T_s$ をそれぞれ $\pm 20\%$ 変化させた根軌跡を示す。安定化には、根の実部を負にし、虚部をゼロに近づけるとよい。よってパラメータのうち $T_f$ を大きくすることで系が安定になることがわかる。しかし $T_f$ を大きくするとデッドタイム誤差補償の効果が薄れる。また $T_s$ を大きくした場合も系の安定化が図れるが、逆起電力検出の遅れが生じ加減速特性が悪化する。よって $K_{ACR}$ を大きくして系の安定化を図るほうが望ましいが、遅れ時間などの制約からゲインが制限される。

以上の考察から、各制御パラメータを定めるには、まず負荷条件に応じた $T_f$ ,  $T_s$ を設定し、 $K_{ACR}$ にて安定化を行うとよい。

### 4. シミュレーションによる検証

$K_{ACR}$ による安定化の実現性を検証するため、回路シミュレータPSIMによるシミュレーションを行った。各パラメータは安定性解析と同じ値を用い、d軸電流制御系の比例ゲインを2倍に変化させ、2.0~4.0secにおける $\omega_{re}=0.70\text{PU}$ のステップ負荷に対するdq軸電流とq軸補償電圧の振動を比較した。なお、ステップ負荷中は安定な根配置、すなわち安定なシステムになることを断っておく。

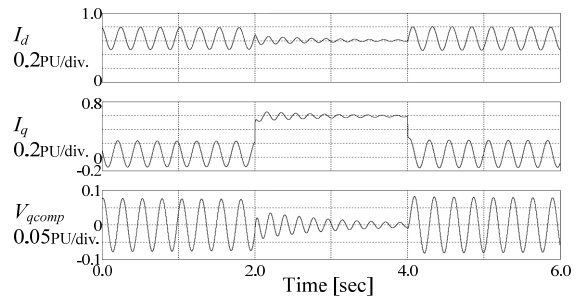


Fig. 3. Vibration in quasi-steady state.

図3 安定限界時の振動

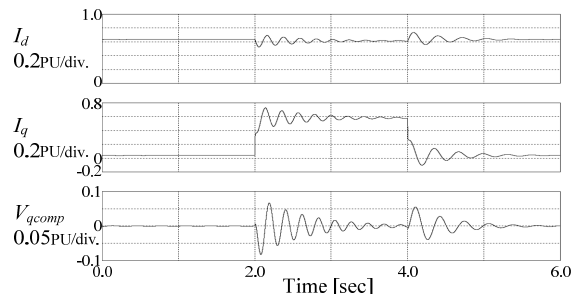


Fig. 4. Damping result with parameter tuning to  $2K_{ACR}$ .

図4 パラメータチューニングによる振動の抑制

図3に安定限界時の結果を示す。電流も補償電圧も振動しており、ほとんど減衰のない状態である。

図4にd軸電流制御系の比例ゲインを2倍した場合の電流とq軸補償電圧値を示す。この場合は1.5sec程度で振動が収まり、安定な系が得られている。

### 5. まとめ

提案する外乱オブザーバによるデッドタイム誤差補償法に対し、根軌跡による安定性解析を行った。その結果、各制御パラメータが安定性に与える影響を把握できた。今後の課題として、実機による試験が挙げられる。

#### 参考文献

- (1) 杉本英彦・小山正人・玉井伸三：「ACサーボシステムの理論と設計の実際」, 総合電子出版社
- (2) 星野哲馬・伊東淳一：電気関係学会北陸支部大会, (2006.9)