

센서없는 유도전동기의 간접 벡터제어를 위한
동기 좌표계 관측기 및 속도적용 알고리즘

신휘범, 박종규*, 김봉식
경상대학교 공과대학 전기공학과

The synchronous DQ-frame observer and the speed adaptation for
algorithm for indirect vector control of sensorless induction motor

Shin Hwi Beom, Park Jong Gyu*, Kim Bong, Sick
Gyeong Sang National University

Abstract - In this study, the full-state flux observer is designed in the synchronous DQ-frame and the speed adaptation rule is derived by using the MRAS(Model Reference Adaptive System) theory. In this rule, the induction motor becomes a reference model and the flux observer is taken as a adjustable model. A guideline of the adaptation gain is investigated for the precise and stable speed adaptation and the proposed scheme is compared with the conventional one designed in the stationary DQ-frame.

1. 서론

현재 가장 널리 사용되고 있는 간접식 벡터제어기에 적용 가능한 전동기속도 추정알고리즘 개발을 목적으로, Luenberger형태의 자속관측기를 동기속도로 회전하는 DQ-좌표계에서 설계하고, 속도적용칙의 이득선정을 위한 기본 규칙을 개발한다. 관측 상태변수 즉, 전류 및 회전자 자속이 직류이므로 작은 관측기 이득으로도 정상상태에 도달한 후에는 오차를 영으로 수렴시키기 가능하므로 고속의 영역에서도 속도추정이 잘 이루어질 것으로 기대된다.

속도센서가 없는 벡터제어기에 의한 유도전동기의 속도제어를 위해서는 파라메타에 둔감한 자속관측기와 속도 추정을 위한 알고리즘을 병행해서 개발하는데 기본의 관측기 및 속도적용칙의 문제점의 원인을 분석하여 해결점을 모색하고, 실제 적용이 가능한 간접 벡터제어기에 기본을 둔 새로운 관측기 및 속도 적용칙을 찾고자 한다.

2. 유도전동기의 벡터제어

동기속도 ω_r 로 회전하는 DQ-좌표계에서 표현된

유도전동기의 상태방정식은 다음식으로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad (1)$$

여기서, $i_s = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$: 고정자 전류,

$\lambda_r = [\lambda_{dr} \ \lambda_{qr}]^T$: 회전자 자속

$4 v_s = [v_{ds} \ v_{qs}]^T$: 고정자 전압,

$$A_{11} = a_{n1}I + a_{l1}J = \left\{ -\frac{1}{\tau_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{\tau_r} \right\} I - \omega_s J$$

$$A_{22} = a_{n2}I + a_{l2}J = -\frac{1}{\tau_r} I - \omega_s J$$

$$A_{12} = a_{n2}I + a_{l2}J = x \left(\frac{1}{\tau_r} I - \omega_s J \right)$$

$$A_{21} = a_{n1}I = \frac{L_m}{\tau_r} I, \quad B_1 = b_n I = \frac{1}{aL_s} I$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad x = \frac{1-\sigma}{\sigma L_m}$$

$$\tau_s = \frac{aL_s}{R_s}, \quad \tau_r = \frac{L_m}{R_r}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

R_s, R_r : 고정자 및 회전자 저항, [Ω]

L_s, L_r : 고정자 및 회전자 자기인덕턴스, [H]

L_m : 자화인덕턴스, [H]

ω_r, ω_e : 회전자 및 동기 각속도, [rad/sec]

ω_{sl} : 슬립 각속도 ($= \omega_e - \omega_r$), [rad/sec].

측정 가능한 변수는 고정자 전류이고, 모든 전기신호는 직류값을 갖는다.

상태방정식 (1)의 자속방정식으로부터 간접벡터제어를 위한 슬립조건을 구하면

$$\omega_d = \frac{L_m}{r_r} \frac{i_{dr}}{\lambda_{dr}}, \quad (2)$$

이 조건이 만족되면 q-축 회전자자속은 항상 영이 되어 발생토오크는 q-축 고정자전류에 비례하고, d-축 회전자자속은 d-축 고정자전류에 비례한다. 따라서, 상간에 coupling현상이 제거되어 고정자전류를 통해 직접 토오크 및 자속을 제어할 수 있다.

3. 전상태 자속관측기 및 속도 적용칙

고정자 전류를 측정변수로 하여 고정자전류 및 회전자자속을 추정하기 위한 전상태 관측기는 동기속도로 회전하는 DQ-좌표계(동기좌표계)에서 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_s \\ \dot{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ \hat{A}_{21} & \hat{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s + G(i_s - i_d) \quad (3)$$

여기서, G 는 관측기 이득이고, 첨자 “^”는 추정치와 관측기에서 사용한 전동기의 파라메타값을 나타낸다. Lyapunov 안정도를 이용하여 속도 및 고정자 저항을 추정하기 위한 적용칙을 얻기 위하여 다음과 같은 Lyapunov 함수를 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} (e^T e + \Delta \omega_r^2 + \Delta R_s^2) \quad (4)$$

여기서, $e = [e_1 \ e_2]^T$, $\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} i_s \\ \dot{\lambda}_r \end{bmatrix}$

안정성을 확보하기 위해서는 $\frac{d}{dt} V \leq 0$ 의 조건을 만족해야 한다. 이식으로부터 적용칙을 유도한다. Lyapunov 함수의 미분치는

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V &= \frac{1}{2} e^T (\bar{A}^T + \bar{A}) e + e^T \Delta A_{11} i_s \\ &\quad + e^T \Delta A_{12} \dot{\lambda}_r - \Delta \omega_r \frac{d \hat{\omega}_r}{dt} - \Delta R_s \frac{d \hat{R}_s}{dt}, \end{aligned}$$

로 주어지며, 이를 음으로 만들기 위하여 $\hat{\omega}_r$, \hat{R}_s 에 대한 조건을 얻을 수 있다. 즉,

$$\frac{d \hat{\omega}_r}{dt} = -e_1^T J(i_s + x \dot{\lambda}_r), \quad (5)$$

$$\frac{d \hat{R}_s}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_s} e_1^T i_s, \quad (6)$$

전동기의 속도는 빠르게 변할 수 있으므로 다음의 비례-적분형의 적용칙을 사용한다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r &= K_{WP}(-e_1^T J(i_s + x \dot{\lambda}_r)) \\ &\quad + K_{Wf} \int_0^t (-e_1^T J(i_s + x \dot{\lambda}_r)) dt \end{aligned} \quad (7)$$

$$\hat{R}_s = -(K_{RH} e_1^T i_s + K_{Rf} \int_0^t e_1^T i_s dt) \quad (8)$$

따라서, 속도와 고정자저항을 추정하기 위한 적용칙은 실제 전류, 관측된 전류 및 관측된 자속을 이용한다.

4. 시스템 구성

그림 1은 간접벡터제어기로 구동되는 속도센서가 없는 유도전동기 속도제어시스템을 나타낸다.

인버터의 전류제어는 동특성이 매우 빠른 히스테리시스 전류제어기를 사용하고, 히스테리시스 깊은 정격의 10[%], 스위칭 주파수는 10[KHz]로 제한한다. 전류 및 전압 측정시 고조파제거를 위한 저주파통과 여과기의 cutoff 주파수는 500[Hz], 제동계수는 0.707로 설정하여 op-amp로 구성한다.

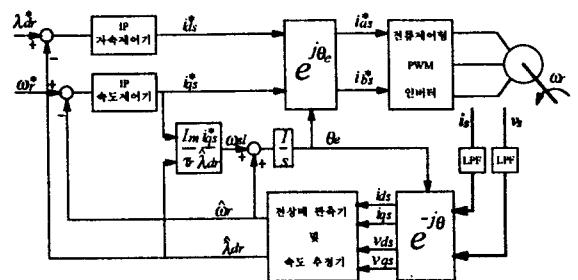


그림 1. 속도센서가 없는 간접벡터제어기에 의한 속도제어시스템

5. 비교 및 고찰

고정좌표계에서 설계된 전상태 자속관측기를 기본으로 한 속도적용칙과 본 연구에서 제시한 동기좌표계에서 설계된 전상태 자속관측기를 기본으로 한 속도적용칙의 성능을 비교, 고찰한다. 그림 2은 속도명령을 0.02[p.u.]로 하고, 속도 상승시간이 0.4[sec], 제동계수가 1을 갖는 적분-비례제어기의 이득과 관측기 이득 k 를 1.2로 설정하여 파라메타 변화에 대한 저속에서의 속도응답 비교를 나타낸다.

그림에서 볼 수 있듯이 저속영역에서는 전류 및 자속의 주파수가 낮아 직류와 유사하므로 고정좌표계 및 동기좌표계의 자속관측기의 성능 유사하게 나타나 두 방식의 속도적용칙의 성능은 거의 같다.

그림 3은 속도명령을 1[p.u.]로 하고, 속도 상승시간이 0.8[sec], 제동계수가 1을 갖는 적분-비례제어기의 이득과 관측기 이득 k 를 1.2로 설정하여 파라메타 변화에 대한 고속에서의 속도응답 비교를 나타낸다.

고속영역에서는 전류 및 자속이 높은 주파수로 변한다. 따라서, 고정좌표계에서 전류 및 자속을 정확하게 관측하기 위하여 높은 관측기이득이 필요하다. 이를 위해 이득을 증가시키면 잡음제거 능력이 저하하고, 속도적용칙이 불안정하게 되어 이득에는 제한이 있어 전류 및 자속에 오차가 존재한다. 이러한 사실 때문에 고정좌표계의 속도적용칙은 고속에서 속도추

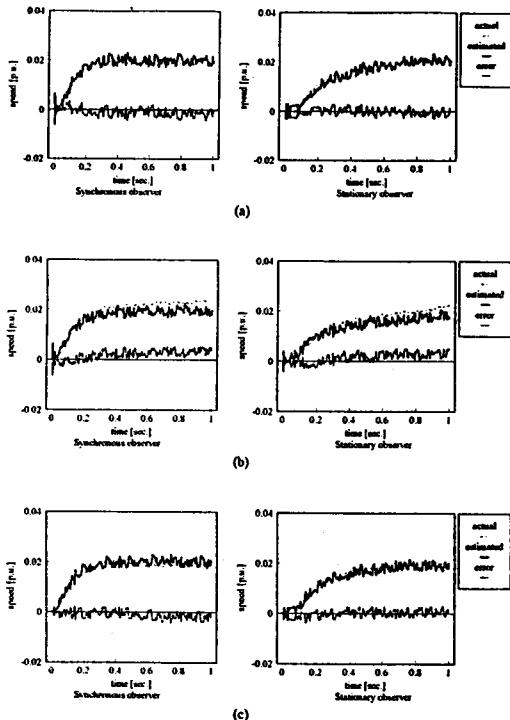


그림 2. 저속운전에의 성능비교; (a)파라메타 변화가 없을 때, (b)20%의 고정자저항 변화, (c)20%의 회전자저항 변화인 경우

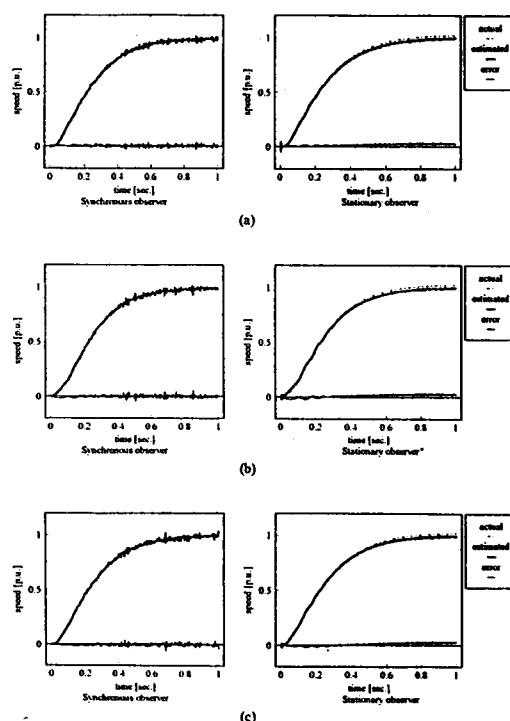


그림 3. 고속운전에서의 성능비교 ; (a)파라메타 변화가 없을 때, (b)20%의 고정자저항 변화, (c)20%의 회전자저항 변화인 경우

정오차가 존재한다. 특히, 전류의 동특성은 매우 빠르므로 작은 이득으로 전류 관측오차를 감소시키지 못하므로 속도적용오차는 주로 전류오차에 기인한다. 반면, 동기좌표계에서는 교류의 전류 및 자속이 직류로 변환되기 때문에 작은 관측기 이득으로도 관측오차를 줄일 수 있으므로 고속에서도 속도적용이 오차 없이 잘 이루어 진다.

5. 결론

본 연구에서 제시된 동기좌표계에서 설계된 상태관측기 및 속도적용칙은 기존의 고정좌표계의 경우보다 고속 영역에서 더욱 정확하게 속도를 추정할 수 있어 가변속 범위가 더욱 확장되었다. 또한, 유도전동기의 가변속운전에 대부분 사용되는 간접벡터제어방식에 적용할 수 있는 장점을 갖고 있어 실제 산업체에 적용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] S. Tamai, H. Sugimoto, and M. Yano,"Speed sensor-less vector control of induction motor applied model reference adaptive system," in Conf. Rec. IEEE/IAS Ann. Mtg. pp. 613-620, 1985
- [2] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational Transducers," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 28, no. 5, pp. 1054-1061, Sept./Oct. 1992
- [3] L. Ben-Brahim and A. Kawamura, "A fully digitized field-oriented controlled induction motor drive using only current sensors," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 39, no. 3, pp. 241-249, June 1992
- [4] H. Tajima and Y. Hori, "Speed sensorless field-orientation control of the induction machine," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 29, no. 1, pp. 175-180, Jan./Feb. 1993
- [5] G. Yang and T. H. Chin,"Adaptive-speed identification scheme for a vector-controlled speed sensorless inverter-induction motor drive," IEEE Trans. Industrial Applications, vol. 29, no. 4, pp. 820-825, July/Aug. 1993
- [6] H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano,"DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor," IEEE Trans. Industrial Applications, vol. 29, no. 2, pp. 344-348, March/April 1993