

# MRAS를 이용한 유도 전동기의 시정수 보상을 갖는 속도 센서리스 벡터제어

°임 태 윤\*, 김 동 회\*, 황 돈 하\*\*, 김 민 회\*\*\*

\*영남대학교, \*\*한국전기연구소, \*\*\*영남이공대학

## Sensorless Vector Control System with Compensated Time Constant of Induction Motor Using a MRAS

°Tae-Yun Lim\*, Dong-Hee Kim\*, Don-Ha Hwang\*\*, Min-Huei Kim\*\*\*

\*Yeungnam University, \*\*KERI, \*\*\*Yeungnam College of Science & Technology

### Abstract

This paper describes a speed sensorless algorithm for vector control system with compensated stator resistance and rotor time constant of induction motor using a model reference adaptive system(MRAS). The system are composed of two MRAC, one is a rotor speed estimation and a stator resistor identification by back-EMF observer, other is used to identify rotor time constant by magnetizing current observer, so that the estimation can be cover a very low speed range with a robust control. The suggest control strategy and estimation method have been validated by simulation study. In the simulation using Matlab/Simulink, the proposed speed sensorless vector control system are shown to operate very well in spite of variable rotor time constant and load fluctuation.

Key Words: Sensorless Algorithm, MRAC, Identification

### I. 서 론

유도전동기의 속도 센서리스 벡터제어에 있어 온도의 변화에 민감한 전동기 파라메타의 변동은 전체 제어 시스템의 성능을 저하시킨다. 이를 해결하기 위하여 다양한 파라메타 추정 알고리즘이 연구되어 지고있다[1][9]. 속도센서리스 벡터제어를 위한 MRAS (Model Reference Adaptive System)에서 기준 모델 (Reference Model)과 적응(Adjustable Model) 모델을 설정할 때 요구되는 고정자 저항과 회전자 시정수의 변동은 속도 추정에 있어서 정상상태 오차 발생으로 인한 전체 시스템의 응답특성과 안정성에 많은 영향을 끼친다.

이에 따라 본 연구에서는 MRAS를 이용한 속도 센서리스 벡터제어에 적응모델의 회전자 시정수를 실

시간으로 동정하기 위해 기준 모델은 전동기 모델링의 전압 모델로부터, 적응모델은 전류모델로부터 유도되어진 자화전류 관측기를 하나 더 추가로 적용하였다. 속도추정을 위한 MRAS의 모델 설정은 자속 모델 대신 저속영역에서 역기전력 발생 및 오프셋 등의 문제를 일으키는 적분항을 제거하기 위해 역기전력 모델을 사용하였고, 또한 고정자저항 변동의 영향을 무시하기 위하여 전류와의 벡터 외적을 통해 고정자 저항 성분을 제거하였다. 이와 같이 두 MRAS를 이용하여 기준 모델의 고정자 저항과 적응모델의 회전자 시정수를 동정함으로써 파라메타 변동에 강인한 제어 알고리즘을 제안 하고자 한다. 제안한 제어시스템의 특성을 분석하고 성능을 입증하기 위하여 일차적으로 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 차후에 제작된 실 시스템에 적용하여 제안한 알고리즘의 성능을 확인하고자 한다.

### II. 유도 전동기의 모델링

벡터제어를 위한 고정자 좌표계에서 유도전동기의 모델링을 고정자 전류  $i_s$ 와 회전자자속  $\lambda_r$  을 사용한 방정식은 식(1)과 같이 된다.

$$p \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_1 \\ A_2 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad (1)$$

$$= Ax + Bv_s$$

$$i = Cx$$

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

$\lambda_r = [\lambda_{dr} \quad \lambda_{qr}]^T$  : 회전자자속

$v_s = [v_{ds} \quad v_{qs}]^T$  : 고정자전압

$A_{11} = -\{R_s/(\sigma L_s) + (1-\sigma)/(\sigma\tau_r)\}I$

$$A_{12} = M/(\sigma L_s L_r) \{ (1/\tau_r)I - \omega_r J \}$$

$$A_{21} = (M/\tau_r)I, \quad A_{22} = -(1/\tau_r)I + \omega_r J$$

$$B_1 = 1/(\sigma L_s)I, \quad C = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix}$$

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

- $R_s, R_r$  : 고정자와 회전자 저항
- $L_s, L_r$  : 고정자와 회전자 인덕턴스
- $M$  : 상호 인덕턴스
- $\sigma$  : 누설계수  $1 - M^2/(L_s L_r)$
- $\tau_r$  : 회전자 시정수  $L_r/R_r$
- $\omega_r$  : 회전자 각 속도 [rad/sec]이다.
- $p$  : 미분연산자

### III. MRAC 시스템

#### 1. 속도 추정

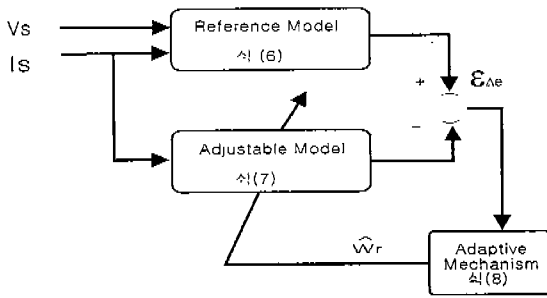


그림 1. 역기전력 모델의 속도 추정 MRAS

고정자 저항 변동의 영향을 줄이기 위해 역기전력 모델에 있어 역기전력 성분  $e$ 와 고정자 전류  $i_s$ 를 벡터 외적 하였다. 전압 모델에 의한 역기전력 방정식은 (2)식으로써 MRAS의 기준 모델로 정하고, 전류모델에 의한 방정식은 식(3)과 같으며 적응 모델로써 사용하였다[9].

$$e_d = \frac{M}{L_r} \frac{d\lambda_{dr}}{dt} = v_{ds} - R_s i_{ds} - \sigma L_s \frac{d i_{ds}}{dt} \quad (2)$$

$$e_q = \frac{M}{L_r} \frac{d\lambda_{qr}}{dt} = v_{qs} - R_s i_{qs} - \sigma L_s \frac{d i_{qs}}{dt}$$

$$\hat{e}_d = \frac{M}{L_r} \frac{d\hat{\lambda}_{dr}}{dt} = \frac{M}{L_r} \frac{M i_{ds} - \hat{\lambda}_{dr} - \hat{\omega}_r \tau_r \lambda_{qr}}{\tau_r} \quad (3)$$

$$\hat{e}_q = \frac{M}{L_r} \frac{d\hat{\lambda}_{qr}}{dt} = \frac{M}{L_r} \frac{M i_{qs} - \hat{\lambda}_{qr} + \hat{\omega}_r \tau_r \lambda_{dr}}{\tau_r}$$

- 속도 추정 에러 신호:  $\epsilon_e$
- $\epsilon_e = e_q \hat{e}_d - e_d \hat{e}_q \quad (4)$
- Adaptive Mechanism: hyperstability 이론에 근

거하여 식(5)에서 구한다.

$$\hat{\omega}_r = k_p \epsilon_e + k_i \int \epsilon_e dt \quad (5)$$

위의 역기전력 성분 식(2)와 식(3)에 고정자 전류  $i_s$ 를 다음과 같이 벡터 외적하면 기준모델 식(2)에서 고정자 저항  $R_s$ 가 제거되어 다음과 같은 구조를 가지는 MRAS를 가진다.

- 기준 모델:  $i_s \otimes e$

$$y = i_s \otimes e = i_s \otimes (v_s - \sigma L_s \frac{d i_s}{dt}) \quad (6)$$

$$= v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} - \sigma L_s \left( \frac{d i_{qs}}{dt} i_{ds} - \frac{d i_{ds}}{dt} i_{qs} \right)$$

- 적응 모델:  $i_s \otimes \hat{e}$

$$\hat{y} = i_s \otimes \hat{e} = \frac{M}{L_r} \left( \frac{\lambda_r}{\tau_r} \otimes i_s + \omega_r (i_s \otimes J \lambda_r) \right) \quad (7)$$

$$= \frac{M}{L_r} \left\{ \frac{1}{\tau_r} (i_{qs} \lambda_{dr} - i_{ds} \lambda_{qr}) + \omega_r (i_{ds} \lambda_{dr} - i_{qs} \lambda_{qr}) \right\}$$

- 속도 추정 에러 신호:  $\epsilon_{\Delta e}$

$$\Delta e = e - \hat{e}$$

$$\epsilon_{\Delta e} = i_s \otimes \Delta e = i_s \otimes e - i_s \otimes \hat{e} = y - \hat{y} \quad (8)$$

- Adaptive Mechanism: 식(5)와 같이 hyperstability 이론에 의하여 구한다.

$$\hat{\omega}_r = k_p \epsilon_{\Delta e} + k_i \int \epsilon_{\Delta e} dt \quad (9)$$

위 식에서  $\otimes$ 는 벡터 외적을 나타내며,

$$e = [e_d \ e_q]^T, \quad \hat{e} = [\hat{e}_d \ \hat{e}_q]^T \quad : \text{전압전류모델에서 각각의 역기전력}$$

$\omega_r, \hat{\omega}_r$  : 실제와 추정치의 회전자 속도이다. 그림 1은 역기전력 모델을 위한 MRAS의 블록도를 나타낸다.

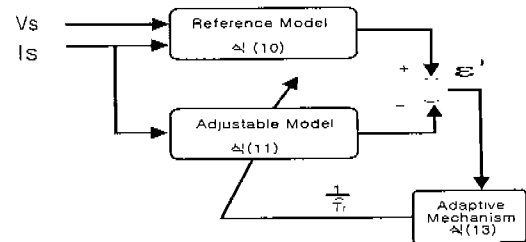


그림 2. 자화전류 모델의 시정수 동정 MRAS

#### 2. 회전자 시정수 동정

위의 속도 추정을 위해 사용된 MRAS에서 식(7)에는 여전히 온도나 외부 조건에 의해 변동이 많은 회전자 저항을 포함한 시정수  $\tau_r$ 이 존재한다. 이러한 회전자 시정수의 변동으로 인한 속도 추정 제어의 특성 저하를 막고 전체 벡터 제어의 중요한 슬립의 정

확도를 확보하기 위해 그림 2와 같이 시정수를 동정하는 또 다른 MRAS를 추가하여 적용한다. 사용된 모델은 (10)식과 (11)식과 같이 전압과 전류 모델에서의 자화전류 관측기이다[6].

### 3. 시정수 보상을 갖는 속도 추정

추정된 속도 정보는 회전자 시정수를 동정하는 모델에 사용되었으며, 또한 여기서 추정되어진 시정수는 상보적으로 속도 추정 모델에 사용되어진다. 따라서 시정수 보상을 갖는 속도 추정 MRAS를 구성할 수 있다[6].

전압 모델 :

$$p i_{d_{mr}} = \frac{L_r}{M^2} [v_{ds} - (R_s + \sigma L_s p) i_{ds}] \quad (10)$$

$$p i_{q_{mr}} = \frac{L_r}{M^2} [v_{qs} - (R_s + \sigma L_s p) i_{qs}]$$

전류 모델 :

$$p \widehat{i}_{d_{mr}} = -\frac{1}{\tau_r} \widehat{i}_{d_{mr}} - \omega_r i_{q_{mr}} + \frac{1}{\tau_r} i_{ds} \quad (11)$$

$$p \widehat{i}_{q_{mr}} = -\frac{1}{\tau_r} \widehat{i}_{q_{mr}} + \omega_r i_{d_{mr}} + \frac{1}{\tau_r} i_{qs}$$

여기서,  $i_{d_{mr}} = \lambda_{dr}/M$ ,  $i_{q_{mr}} = \lambda_{qr}/M$  이다.

위의 두 모델을 이용한 MRAS의 구조는 그림 2와 같으며 기준 모델과 적응 모델은 각각 식(10)과 식(11)과 같다. 여기에서 두 상태 방정식의 상태 에러 방정식은 다음 식(12)와 같다.

$$p \varepsilon = A \varepsilon - B \quad (12)$$

여기서,  $\varepsilon = [\varepsilon_d \quad \varepsilon_q]^T$   
 $\varepsilon_d = i_{d_{mr}} - \widehat{i}_{d_{mr}}$ ,  $\varepsilon_q = i_{q_{mr}} - \widehat{i}_{q_{mr}}$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_r} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \widehat{i}_{d_{mr}} - i_{ds} \\ \widehat{i}_{q_{mr}} - i_{qs} \end{bmatrix} \left( \frac{1}{\tau_r} - \frac{1}{\tau_r} \right)$$

이를 통해 hyperstability이론에 따라 Adaptive Mechanism에 의한 회전자 시정수 추정은 식(13)을 적용 하였다.

$$\frac{1}{\tau_r} = k_p \varepsilon' + k_i \int \varepsilon' dt \quad (13)$$

여기서,  $\varepsilon' = \varepsilon_d (i_d - \widehat{i}_{d_{mr}}) + \varepsilon_q (i_q - \widehat{i}_{q_{mr}})$  이다.

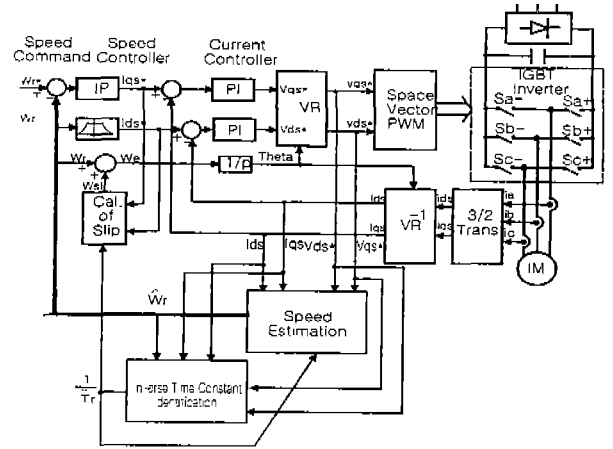


그림 3. MRAS를 이용한 시정수 보상을 갖는 속도추정 벡터제어 시스템

## IV. 시뮬레이션 결과

그림 3은 본 연구에서 제안한 MRAS를 이용한 시정수 보상을 갖는 유도전동기 속도추정 벡터제어 시스템 블록도이다.

제안된 알고리즘의 기능을 확인하고 특성 분석을 위하여 Matlab/simulink를 이용하여 유도전동기 속도제어 시스템에 적용된 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 적용한 유도전동기의 정격이며, 그림 4-7은 시뮬레이션 결과이다. 그림 4.는 시정수 변동이 없는 경우로 시정수가 일정 할 때 속도제어 특성으로, 속도 명령을 0 - 200 - 1700 - 900[rpm]으로 가변 하였을 때의 속도 추정 특성이다. 그림 5.는 시정수 보상 없이 시정수가 50%로 감소 하였을 때 속도제어 특성이다. 그림 6.은 시정수가 50% 감소하였을 때 시정수 보상용 MRAS가 있는 경우의 속도제어 특성이다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 시정수 추정 MRAS가 없는 경우의 속도추정 특성은 과도상태와 정상상태에서 오차를 발생함을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 시스템의 벡터제어시 Vds 와 Vqs 를 x,y좌표축에서 위상관계를 측정 한 것으로, 정상상태에서 원이 그려지므로 벡터제어가 정상적으로 수행되고 있음을 알 수 있다

표 1. 유도 전동기의 정격과 파라메타

정격		파라메타	
출력	175[w]	$R_s$	0.7138[Ω]
전압	220[v]	$R_r$	0.7732[Ω]
전류	14[A]	$L_s$	0.07916[mH]
정격 속도	1800[rpm]	$M$	0.07501[mH]
극수	4	$L_r$	0.07916[mH]
$B$	0.01	$J$	0.025[kg-m <sup>2</sup> ]

## V. 결론

유도전동기의 속도검출기 없는 벡터제어를 위한 MRAS에서 기준모델과 적응모델을 설정할 때 요구되는 고정자 저항과 회전자 시정수의 변동에 따른 속도 추정에 있어 응답특성과 안정성을 향상시키기 위하여 시정수를 보상하는 유도전동기 속도추정 시스템을 제안하였다.

속도추정을 위한 MRAS의 모델 설정은 자속모델 대신 저속영역에서 역기전력 발생 및 오프셋 등의 문제를 일으키는 적분항을 제거하기 위해 역기전력 모델을 사용하였고, 고정자 저항 변동의 영향을 적게하기 위하여 전류와의 벡터 외적을 통해 고정자 저항성분을 제거하였다. 이와 같이 두 MRAS를 이용하여 기준 모델의 고정자 저항과 적응 모델의 회전자 시정수를 동정함으로써 파라메타 변동에 강인성을 가지는 제어시스템을 제안하였다. 제안한 제어시스템의 특성을 분석하고 성능을 입증하기 위하여 일차적으로 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 가능성을 확인하였으며, 이차적으로 실 시스템에 적용하여 제안한 알고리즘의 특성을 확인 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Min-Huei Kim, James C. Hung, "Vector Control System for Induction Motor without Speed Sensor at very Low Speed", IECON'95, pp524-529, 1995
- [2] Li Zhen and Longya Xu, "Sensorless Field Orientation Control of Induction Machines Based on a Mutual MRAS Scheme", IEEE-IE, Vol. 45, No. 6, October 1998
- [3] Shyh-Shing Perng, Yen-Shin Lai and Chang-Huan Liu, "Sensorless Vector controller for Induction Motor Drives with Parameter",
- [4] Mohsen Elloumi, Laser Ben-Brahim, "Survey of Speed Sensorless Control for IM Drives", IECON'98, pp1018-1023, 1998
- [5] Faa-Jeng Lin, Hong-Pong Chen, Ho-Ming Su, "Induction Motor Servo Drive with Adaptive Rotor Time-Constant Estimation", IEEE-AES, Vol.34, No.1, pp 224-234, Jan.1998
- [6] Hisao Kubota, "DSP-based Adaptive Flux observer of induction motor", IEEE Trans. IA, March Vol. 29, No. 2, 1996
- [7] I. D. Landau "A survey of Model Reference Adaptive Techniques Theory and Application", Automatica, Vol. 10, 1974

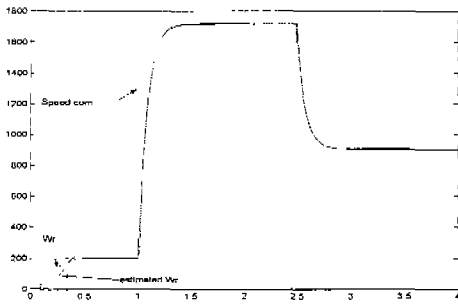


그림 4. 시정수 변동 없을 때의 속도 추정

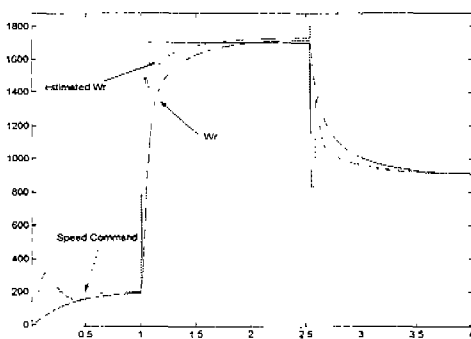


그림 5. 시정수 보상이 없는 속도 추정

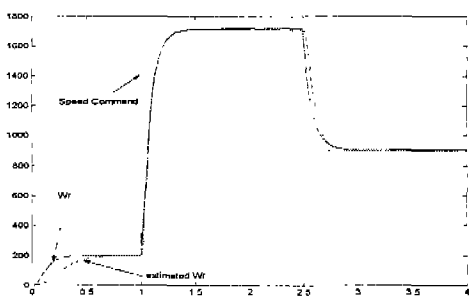


그림 6. 시정수 보상 MRAS를 갖는 속도 추정

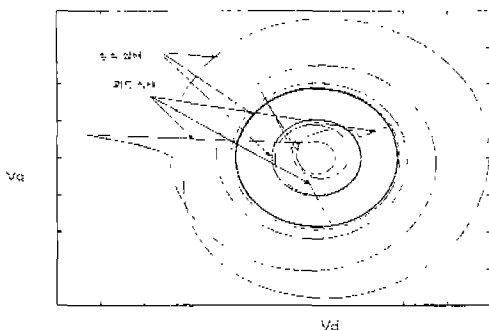


그림 7.  $V_{ds}$ 와  $V_{qs}$ 의 직교 좌표상에서의 행적