

# MRAS에 의한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어

## MRAS Based Sensorless Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

金 映 三\* · 權 營 顏\*\*

(Young-Sam Kim · Young-Ahn Kwon)

**Abstract** - Speed and torque controls of permanent magnet synchronous motors are usually attained by the application of position and speed sensors. However, speed and position sensors require the additional mounting space, reduce the reliability in harsh environments and increase the cost of a motor. Therefore, many studies have been performed for the elimination of speed and position sensors. This paper investigates a novel speed sensorless control of a permanent magnet synchronous motor. The proposed control strategy is based on the MRAS(Model Reference Adaptive System) using the state observer model with the current error feedback and the magnet flux model as two models for the back-emf estimation. The proposed algorithm is verified through the simulation and experiment.

**Key Words** : MRAS, Sensorless Control, Permanent Magnet Synchronous Motor

### 1. 서 론

영구자석 동기전동기는 높은 전력밀도와 제어의 정밀성으로 인하여 많은 산업현장과 가전기에 광범위하게 응용되고 있다. 특히 종래의 직류전동기가 사용되는 가변속 구동을 위한 서보시스템에서 활용도가 높아지고 있다. 영구자석 동기전동기는 정확한 속도 및 토크 제어를 위해서는 회전자의 속도뿐만 아니라, 회전자의 위치정보가 반드시 요구된다. 회전자의 위치 및 속도 센서로서는 홀 소자, 레졸버 및 엔코더와 같은 센서 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 센서들은 경제적인 문제점과 센서의 안정성을 확보하기 위한 전동기의 설계 및 가공 공정이 복잡해지는 단점이 있으며, 주위 온도가 높거나 습기가 심한 곳 또는 진동이 심한 환경에서는 센서의 신뢰도가 감소한다. 최근에는 이러한 경제성 및 신뢰성 향상을 위하여 속도 및 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어방식의 연구가 많이 이루어지고 있다.

센서리스 제어 방식으로는 구형파형 BLDC 전동기의 경우, 역기전력을 이용한 위치검출 방식, 고정자 상권선에서 제 3고조파를 이용하여 위치를 구하는 방식, 프리휠링 다이오드의 도전구간을 검출하여 회전자의 위치를 구하는 방식 등이 있다[1-3]. 이러한 방식들은 비교적 간단하게 센서리스 제어를 수행할 수 있는 장점이 있지만 정현파형 영구자석 동기전동기에는 적용이 어렵고 정밀한 속도제어를 구현하기가 어렵다.

영구자석 동기전동기의 경우에는 고정자전압 및 전류 값을

측정하여 전동기 방정식으로부터 속도를 추정하는 방식[4-8], 관측기에 의해 자속 및 역기전력을 추정하고 속도정보를 얻는 방식[9-14], 입출력이 잡음의 영향을 받을 경우에 최적의 필터링 알고리즘인 칼만 필터를 이용하는 방식[15-19], 가변 구조제어를 활용하는 방식[20,21], 기계적 구조에 의한 전압 및 전류 고조파를 분석하여 속도를 추정하는 방식[22-24], 인공지능을 활용하는 제어 방식[25-27] 및 직접토크제어를 활용하는 방식[28-32] 등이 있다.

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어방식으로서 MRAS(Model Reference Adaptive System) 방식을 제안한다. MRAS는 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하여 비교적 폭넓게 사용되는 제어구조의 하나로서 유도전동기의 센서리스 제어에 많이 활용되었다[33-35]. 본 논문에서 제시하는 MRAS 방식에서 두 추정기 모델의 출력 변수는 역기전력이다. 그리고 본 방식은 MRAS의 기준모델에서 측정전류를 피드백하는 상태관측기로부터 역기전력을 추정하고, 비교모델에서 영구자석 자속에 의한 수식을 이용하여 역기전력을 추정하며, 두 추정기 모델에서 추정된 역기전력을 상호 비교하고 그 오차를 적응 메카니즘에 적용하여 회전자 속도를 추정하는 방식이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 시뮬레이션과 실험을 수행하여 성능을 검증한다.

### 2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델

그림 1은 본 논문에서 사용하는 3상 원통형 영구자석 동기전동기의 등가모델이다. 또한 전동기의 3상 실측, 2상 고정자 및 회전자 기준 좌표축의 상관관계를 그림 1에 나타낸다.

영구자석 동기전동기의 실측 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{as} &= R_a i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \\ &= R_a i_{as} + \frac{3}{2} L_a \frac{di_{as}}{dt} + e_{as} \end{aligned} \quad (1)$$

\* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2003年 5月 15日

最終完了 : 2003年 10月 6日

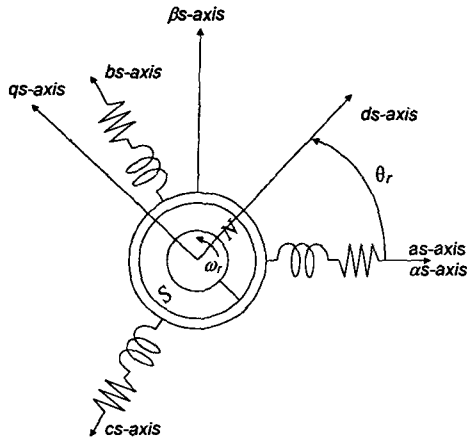


그림 1 영구자석 동기전동기의 등가모델  
Fig. 1 The Equivalent model of PMSM

$$\begin{aligned} v_{bs} &= R_a i_{bs} + \frac{d\Psi_{bs}}{dt} \\ &= R_a i_{bs} + \frac{3}{2} L_a \frac{di_{bs}}{dt} + e_{bs} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_{cs} &= R_a i_{cs} + \frac{d\Psi_{cs}}{dt} \\ &= R_a i_{cs} + \frac{3}{2} L_a \frac{di_{cs}}{dt} + e_{cs} \end{aligned} \quad (3)$$

단,  $R_a, L_a$ : 상권선의 등가저항, 등가 인덕턴스

여기서 각 상권선의 역기전력은 상권선에 채교하는 영구자석의 자속으로부터 다음과 같다.

$$e_{as} = \frac{d\Psi_{af}}{dt} = -\omega_r K_E \sin \theta_r \quad (4)$$

$$e_{bs} = \frac{d\Psi_{bf}}{dt} = -\omega_r K_E \sin \left( \theta_r - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (5)$$

$$e_{cs} = \frac{d\Psi_{cf}}{dt} = -\omega_r K_E \sin \left( \theta_r - \frac{4}{3} \pi \right) \quad (6)$$

단,  $\theta_r$  : 회전자 전기 위치각

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$  : 회전자 전기 각속도

$K_E$  : 역기전력 상수

식(1)-(3)에서 좌표변환에 의하여 2상 고정자 기준 좌표계  $as - \beta s$ 축의 전압방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$v_{as} = R_s i_{as} + L_s \frac{di_{as}}{dt} + e_{as} \quad (7)$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + e_{\beta s} \quad (8)$$

단,  $R_s = R_a, L_s = \frac{3}{2} L_a$

여기서  $as - \beta s$ 축의 역기전력은 다음과 같다.

$$e_{as} = \frac{d\Psi_{af}}{dt} = -\omega_r K_e \sin \theta_r \quad (9)$$

$$e_{\beta s} = \frac{d\Psi_{\beta f}}{dt} = \omega_r K_e \cos \theta_r \quad (10)$$

단,  $K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} K_E$

식(1)-(3)에서 좌표변환에 의하여 2상 회전자 기준 좌표계  $ds - qs$ 축의 전압방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_s i_{qs} \quad (11)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_s i_{ds} + \omega_r K_e \quad (12)$$

토크 방정식을 회전자 기준 좌표계에서 나타내면 다음과 같다.

$$T = P K_e i_{qs} \quad (13)$$

단,  $P$ : 쌍극수

따라서 원통형 영구자석 동기전동기의 발생토크는  $qs$ 축 전류성분에 의해서 제어된다.

영구자석 동기전동기의 운동방정식은 다음과 같다.

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_L \quad (14)$$

단,  $T$ : 발생 토크,  $T_L$ : 부하토크,

$J$ : 관성계수,  $D$ : 마찰계수

### 3. MRAS에 의한 센서리스 제어

본 논문에서 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어방식으로서 MRAS(Model Reference Adaptive System) 방식을 제시한다. 일반적으로 MRAS에 의한 센서리스 속도제어는 두 추정기의 출력을 비교하여 두 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시킴으로써 회전자속도를 추정하는 방식으로서 유도전동기의 센서리스 제어에 많이 활용되었다[33-35]. 본 논문에서 제안하는 방식은 2장에서 기술한 전동기 방정식에 근거하여 MRAS의 기준모델에서 측정전류를 피드백하는 상태관측기로부터 역기전력을 추정하고, 비교모델에서 영구자석 자속에 의한 수식을 이용하여 역기전력을 추정하는 방식이다. 이 방식은 상태관측기의 장점과 함께 파라미터변동에 따른 영향이 상대적으로 강인한 성능을 가지게 된다.

#### 3.1 상태관측기의 구성

고정자 기준 좌표계에서 영구자석 동기전동기의 전압방정식을 고정자전류와 역기전력을 상태변수로 하는 상태방정식으로 나타내면 식(7), (8)로부터 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ e_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ e_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} v_s \quad (15)$$

$$= A x + B v_s$$

$$i_s = C x \quad (16)$$

단,  $i_s = [i_{as} \ i_{\beta s}]^T$ ,  $e_s = [e_{as} \ e_{\beta s}]^T$ ,  $v_s = [v_{as} \ v_{\beta s}]^T$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & 0 \\ 0 & -R_s/L_s \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} -1/L_s & 0 \\ 0 & -1/L_s \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & 1/L_s \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

역기전력 추정을 위하여 측정전류 피드백을 가지는 전차수 관측기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + B v_s + L (i_s - \hat{i}_s) \quad (17)$$

$$\hat{i}_s = C \hat{x} \quad (18)$$

단,  $\hat{x}$  : 상태관측기 추정치,  $L$  : 관측기 이득

식(17)에서 시스템 계수행렬은 시변계수인 회전자 속도항을 포함하며, 추정된 회전자 속도에 의해 가변하는 적응관측기를 구성한다. 여기서 전류상태변수는 측정 가능한 상태변수이므로 이를 제외시킨 축소차수 관측기의 구성이 가능하며 본 논문에서는 다음과 같은 축소차수 적응관측기를 적용한다[10].

$$\dot{\hat{w}} = F \hat{w} + D i_s + G v_s \quad (19)$$

$$\hat{w} = \hat{z} - L i_s \quad (20)$$

단,  $\hat{w} = [\hat{w}_1 \ \hat{w}_2]^T$ ,  $\hat{z} = [\hat{e}_{as} \ \hat{e}_{\beta s}]^T$

$$F \equiv A_{22} - L A_{12}, \quad D \equiv F L + A_{21} - L A_{11}$$

$$G \equiv B_2 - L B_1$$

### 3.2 MRAS의 구성

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어를 위하여 기준모델로서 식(19), (20)과 같은 측정전류 피드백을 가지는 축소차수 상태관측기를 사용하여 역기전력을 추정하고, 비교모델로서 식(9), (10)과 같은 영구자석 자속에 의한 수식을 사용하여 역기전력을 추정하는 MRAS를 구성한다. 그림 2는 제안한 MRAS의 속도추정 블록도이다. 본 논문에서 제시한 방식은 상태관측기가 자속모델과 적절히 결합하여 상태관측기의 장점과 함께 파라미터변동에 따른 영향이 상대

적으로 강인한 성능을 가지게 된다.

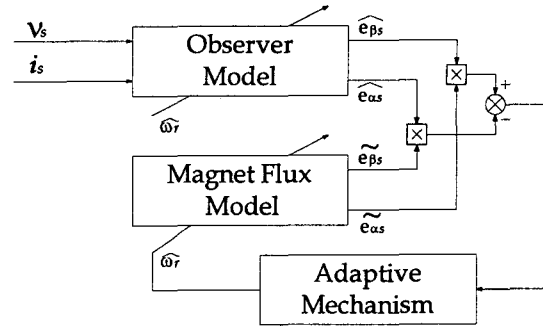


그림 2 제안한 MRAS의 속도추정 블록도

Fig. 2 Block diagram of a proposed MRAS based speed estimation

본 방식에서 적응메카니즘에 의한 회전자속도는 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\omega}_r = K_P (\hat{e}_{\beta s} \hat{e}_{\alpha s} - \hat{e}_{\alpha s} \hat{e}_{\beta s}) + K_I \int (\hat{e}_{\beta s} \hat{e}_{\alpha s} - \hat{e}_{\alpha s} \hat{e}_{\beta s}) dt \quad (21)$$

단,  $\hat{e}_{\alpha s}$ ,  $\hat{e}_{\beta s}$  : 상태관측기의 역기전력 추정값

$\hat{e}_{\alpha s}$ ,  $\hat{e}_{\beta s}$  : 영구자석 자속모델의 역기전력 추정값

이상에서 제시한 센서리스 속도제어 시스템의 전체구성도는 그림 3과 같다.

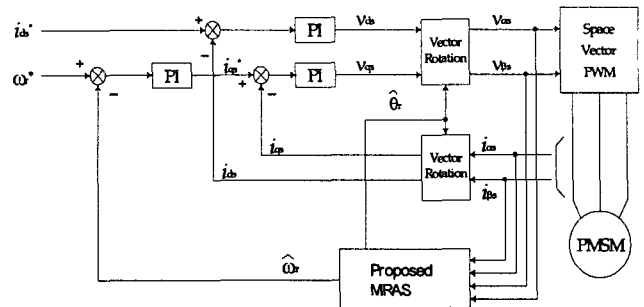


그림 3 전체시스템 구성도

Fig. 3 Configuration of overall system

### 4. 시뮬레이션

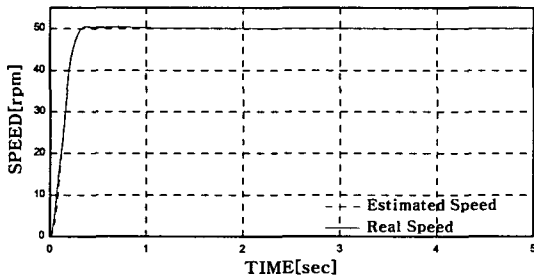
본 논문에서 제시한 센서리스 속도제어방식의 타당성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션과 실험에 사용된 영구자석 동기전동기는 3상 원통형으로서 전동기 사양은 표 1과 같고 샘플링주기는 200μsec이다.

그림 4(a), (b) 및 (c)는 무부하에서 속도지령치를 각각 50rpm, 200rpm 및 1000rpm으로 한 경우의 속도응답을 나타내고 있다. 결과에서 나타난 바와 같이 본 논문에서 제안한 방식은 저속과 고속에서 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

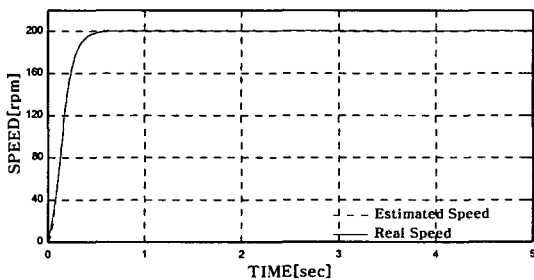
표 1 전동기 사양

Table 1 Motor specification

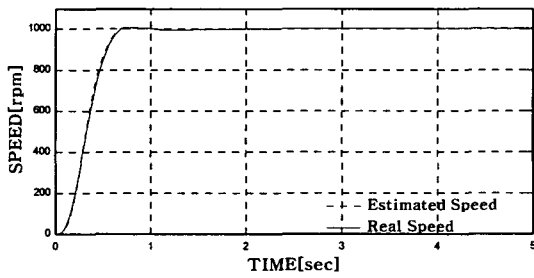
극수	8 pole
정격출력	750 W
정격전류	5.3 A
역기전력상수( $K_E$ )	0.132 Vsec/rad
고정자 권선저항( $R_a$ )	1.0 $\Omega$
고정자 인덕턴스( $L_a$ )	4.17 mH
권선방식	Y결선
회전자 관성(J)	0.0106 $\text{Kgm}^2$
회전자 마찰계수(D)	0.005 $\text{Kgm}^2/\text{s}$



(a)



(b)



(c)

그림 4 속도응답 시뮬레이션

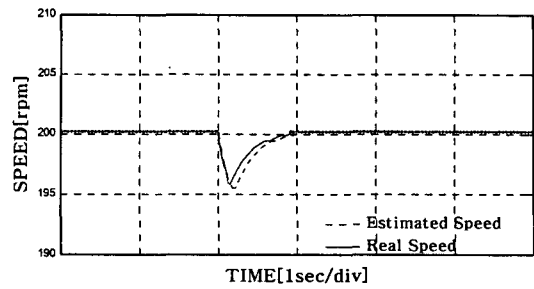
(a) 50rpm (b) 200rpm (c) 1000rpm

Fig. 4 Speed responses in the speed commands

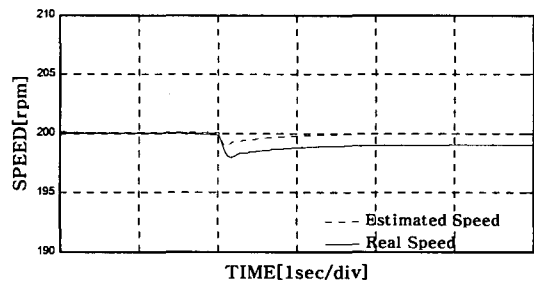
(a) 50rpm (b) 200rpm (c) 1000rpm

그림 5와 6은 전동기 고정자저항의 변동 및 역기전력상수의 변동을 고려한 경우로서 각각 모델의 고정자저항을 공칭값보다 50% 증가한 경우와 역기전력상수를 공칭값보다 20% 감소한 경우의 속도응답을 나타낸다. 무부하에서 200rpm으로 운전 중에 파라미터를 변동하였다. 또한 본 방식과 상태관측기에 의한 방식을 비교하기 위하여 이들 방식에서 시뮬레이션을 수행하였으며 결과에서 나타난 바와 같이 파라미터 변

동을 고려하는 경우에 본 논문에서 제안한 방식이 종래의 방식보다 우수함을 잘 나타내고 있다.



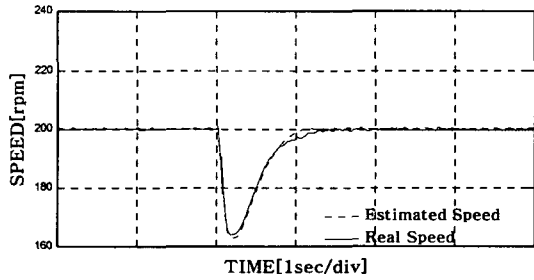
(a)



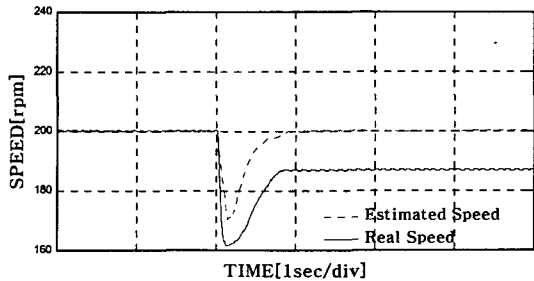
(b)

그림 5 고정자저항 변동에서 속도응답 ( $R_s = 1.5R_s$ , 200rpm) (a) 제안한 MRAS (b) 상태관측기

Fig. 5 Speed responses in the stator resistance variation (a) Proposed MRAS (b) State observer



(a)



(b)

그림 6 역기전력상수 변동에서 속도응답 ( $K_e = 0.8K_e$ , 200rpm) (a) 제안한 MRAS (b) 상태관측기

Fig. 6 Speed responses in the back EMF-constant variation (a) Proposed MRAS (b) State observer

5. 실험결과 및 검토

본 논문에서 제시한 센서리스 속도제어방식의 실험적인 검증을 위하여 실험장치를 구성하였다. 전체 알고리즘의 디지털 처리를 위해서 마이크로프로세서 시스템(80586/150MHz)을 이용하였으며 샘플링주기는 200  $\mu$ sec 로 하였다. 3상 인버터의 전력소자는 IGBT를 사용하였으며 실험에서 사용된 영구자석 동기전동기는 국내에서 생산되는 일반용 영구자석 동기전동기로서 전동기사양은 4장의 표 1과 같다.

그림 7(a), (b) 및 (c)는 무부하에서 속도지령치를 각각 50rpm, 200rpm 및 1000rpm으로 한 경우의 속도응답 실험결과이다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 저속과 고속에서 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

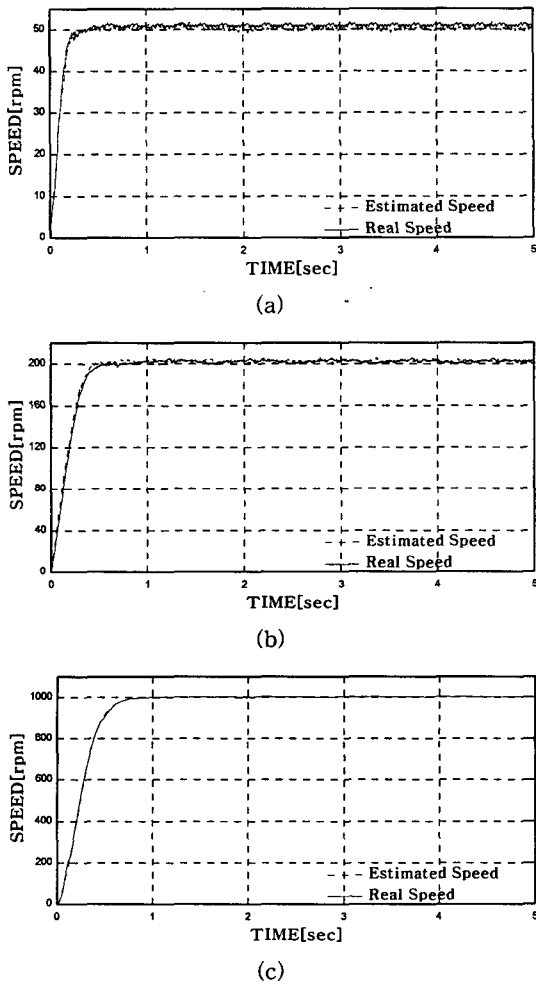


그림 7 속도응답 실험결과  
 (a) 50rpm (b) 200rpm (c) 1000rpm  
 Fig. 7 Experimental speed responses in the speed commands (a) 50rpm (b) 200rpm (c) 1000rpm

그림 8과 9는 전동기 고정자저항의 변동 및 역기전력상수의 변동을 고려한 경우로서 각각 모델의 고정자저항을 공칭값보다 50% 증가한 경우와 역기전력상수를 공칭값보다 20% 감소한 경우의 속도응답 실험결과이다. 무부하에서 200rpm으

로 운전 중에 파라미터를 변동하였다. 또한 본 방식과 상태관측기에 의한 방식을 비교하기 위하여 이들 방식에서 실험

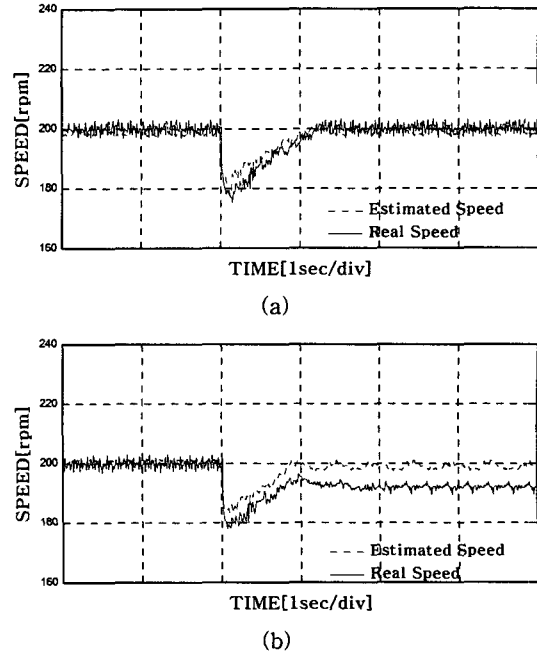


그림 8 고정자저항 변동에서 속도응답 실험결과 ( $R_s = 1.5R_s$ , 200rpm) (a) 제안한 MRAS (b) 상태관측기  
 Fig. 8 Experimental speed responses in the stator resistance variation (a)Proposed MRAS (b) State observer

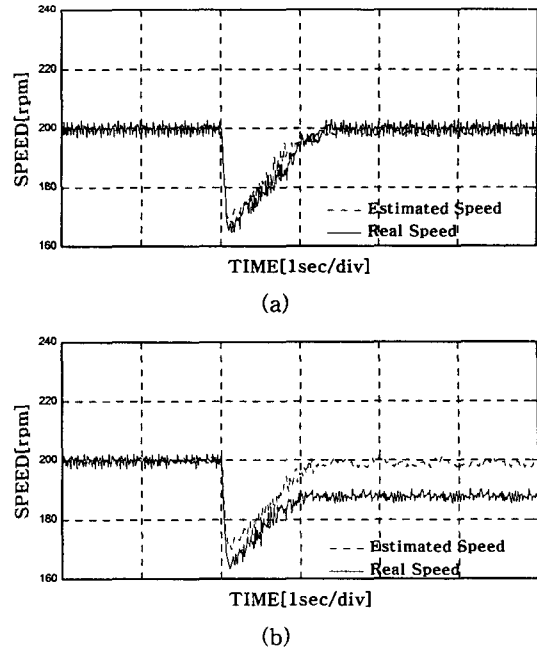


그림 9 역기전력상수 변동에서 속도응답 실험결과 ( $K_e = 0.8K_e$ , 200rpm) (a) 제안한 MRAS (b) 상태관측기  
 Fig. 9 Experimental speed responses in the back EMF constant variation (a) Proposed MRAS (b) State observer

을 수행하였으며 실험결과에서 나타난 바와 같이 파라미터 변동을 고려하는 경우에 본 논문에서 제안한 방식이 종래의 방식보다 우수함을 잘 나타내고 있다.

**감사의 글**

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2003-000-11955-0) 지원으로 수행되었음

**6. 결 론**

영구자석 동기전동기에 의한 가변속 구동시스템이 산업현장과 가전기에 광범위하게 활용되고 있으며 최근에는 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 속도제어가 많이 연구되고 있다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어방식으로서 MRAS 방식을 제안하였다. MRAS는 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하여 비교적 폭넓게 사용되는 제어구조의 하나로서 유도전동기의 센서리스 제어에 많이 활용되었다. 본 방식은 MRAS의 기준모델에서 측정전류를 피드백하는 상태관측기로부터 역기전력을 추정하고, 비교모델에서 영구자석 자속에 의한 수식을 이용하여 역기전력을 추정하며, 두 추정기 모델에서 추정된 역기전력을 상호 비교하고 그 오차를 적용 메카니즘에 적용하여 회전자 속도를 추정하는 방식이다. 제안한 센서리스 제어방식을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한 결과, 저속 및 고속 운전에서 양호한 속도응답을 나타내었으며, 고정자저항 변동 및 역기전력상수 변동을 고려한 경우에도 강인한 속도응답을 나타내었다. 특히 파라미터 변동시에 종래의 방식보다 우수한 속도응답을 나타내었다.

**참 고 문 헌**

[1] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo and K. Mohri, "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor," IEEE IA-21, No.4, pp.595-601, 1985.  
 [2] J C. Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range," IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.401-407, 1994.  
 [3] S. Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors," IEEE IA-27, No. 5, pp.928-933, 1991.  
 [4] R. Wu and G. R. Slemon, "A Permanent Magnet Motor Drive Without a Shaft Sensor," IEEE IAS Annual Meeting, pp. 553-558, 1990.  
 [5] N. Matsui and M. Shigo, "Brushless dc Motor Control Without Position and Speed Sensors," IEEE, IA-28, No. 1, pp 120-127, 1992.  
 [6] A. B. Kulkarni and M. Ehsani, "A Novel Position Sensor Elimination Technique for the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive," IEEE IA-28, No. 1, pp. 144-150, 1992.  
 [7] M. Naidu and B. K. Bose, "Rotor Position Estimation

Scheme of a Permanent Magnet Synchronous Machine for High Performance Variable Speed Drive," IEEE IAS Annual Meeting, pp. 48-53, 1992.  
 [8] N. Ertugrul and P. P. Acarnley, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors," IEEE IA-30, No. 1, pp. 126-133, 1994.  
 [9] L. A. Jones and J. H. Lang, "A State Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE IE-36, No. 3, pp. 374-382, 1989.  
 [10] J. S. Kim and S. K. Sul, "High Performance PMSM Drives without Rotational Position Sensors Using Reduced Order Observer," IEEE IAS Annual Meeting, pp. 75-82, 1995.  
 [11] J. Solsona, M. I. Valla and C. Muravchik, "A Nonlinear Reduced Order Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE IE-43, No. 4, pp. 492-497, 1996.  
 [12] K. Tatematsu, D. Hamada, K. Uchida, S. Wakao and T. Onuki, "Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Reduced Order Observer," IEEE Proc APEC, Vol. 1, pp. 75-80, 1998.  
 [13] Z. Guchuan, A. Kaddouri, L. Dessaint and O. Akhrif, "A Nonlinear State Observer for the Sensorless Control of a Permanent-Magnet AC Machine," IEEE IE-48, No. 6, pp.1098-1108, 2001.  
 [14] M. Carpita, D. Colombo and A. Monti, "Innovative Observer Algorithm for Sensorless Control of AC Permanent Magnet Synchronous Machines," IEEE Proc APEC. Vol. 2, pp.865-871, 2001.  
 [15] R. Dhaouadi, N. Mohan, and L. Norum, "Design and Implementation of an Extended Kalman Filter for the State Estimation of a Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE PE-6, No. 3, pp. 491-497, 1991.  
 [16] H. W. Kim and S. K. Sul, "A New Motor Speed Estimator Using Kalman Filter in Low-Speed Range," IEEE IE-43, No. 4, pp. 498-504, 1996.  
 [17] R. C. Panaitescu and L. E. Norum, "Kalman-Filter Based Sensorless Control of An IPM Motor Drive," Proc ECPEA, Vol. 4, pp. 4567-4572, 1997.  
 [18] S. Bolognani, R. Oboe and M. Ziliotto, "Sensorless Full-Digital PMSM Drive With EKF Estimation of Speed and Rotor Position," IEEE IE-46, No. 1, pp. 184-191, 1999.  
 [19] S. Bolognani, L. Tubiana and M. Ziliotto, "EKF-based Sensorless IPM Synchronous Motor Drive for Flux-weakening Applications," IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.112-119, 2002.  
 [20] F. Parasiliti, R. Petrella and M. Tursini, "Sensorless Speed Control of a PM Synchronous Motor Based on Sliding Mode Observer and Extended Kalman Filter," IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.533-540, 2001.  
 [21] J. Hu, D. Zhu and Y. Li, "Application of Sliding Observer to Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System," IEEE Proc PESC, Vol. 1, pp.532-536, 1994.  
 [22] M. J. Corley and R. D. Lorentz, "Rotor Position and Velocity Estimation for a Salient-pole Permanent Magnet

Synchronous Machine at Standstill and High Speeds," IEEE IA-34, No. 4, pp.784-789, 1998.

[23] S. Ogasawara and H. Akagi, "Implementation and Position Control Performance of a Position-sensorless IPM Motor Drive System Based on Magnetic Saliency," IEEE IA-34, No. 4, pp.806-812, 1998.

[24] V. Petrovic and A. M. Stankovic, "Saliency-based Position Estimation in PM Synchronous Motors," IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 2, pp.801-806, 2001.

[25] L. Tong, M. Elbuluk and I. Husain, "Sensorless Adaptive Neural Network Control of Permanent Magnet Synchronous Motors," Proc IEMD, pp.287-289, 1999.

[26] T. D. Batzel and K. Y. Lee, "A Diagonally Recurrent Neural Network Approach to Sensorless Operation of the Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE PES Summer Meeting, Vol. 4, pp.2441-2445, 2000.

[27] L. Hongru, J. Wang, S. Gu and T. Yang, "A Neural-Network-Based Adaptive Estimator of Rotor Position and Speed for Permanent Magnet Synchronous Motor," Proc ICEMS, Vol. 2, pp.735-738, 2001.

[28] M. F. Rahman, L. Zhong, K. W. Lim and M. A. Rahman, "A Direct Torque Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drive without a Speed Sensor," Proc IEMD, pp. 123-125, 1999.

[29] F. Minghua and X. Longya, "A Sensorless Direct Torque Control Technique for Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.159-164, 1999.

[30] M. E. Haque, L. Zhong and M. F. Rahman, "A Sensorless Initial Rotor Position Estimation Scheme for a Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive," IEEE Proc APEC, Vol. 2, pp.879-884, 2001.

[31] M. E. Haque, L. Zhong and M. F. Rahman, "A Sensorless Speed Estimator for Application in a Direct Torque Controller of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Incorporating Compensation of Offset Error," IEEE Proc PESC, Vol. 1, pp.276-281, 2002.

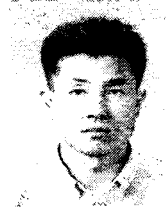
[32] L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman and Y. Hu, "A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System with Low Ripple in Torque and Flux - a Speed Sensorless Approach," IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.104-111, 2002.

[33] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers," IEEE IA-28, No. 5, pp.1054-1061, 1992.

[34] F. Z. Peng and T. Fukao, "Robust Speed Identification for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors," IEEE IA-30, No.5, pp.1234-1240, 1994.

[35] Y. A. Kwon and D. W. Jin, "A Novel MRAS Based Speed Sensorless Control of Induction Motor," IEEE Proc IECON, Vol. II, pp.933-938, 1999.

저 자 소 개



김 영 삼(金 暎 三)

1975년 2월 23일생. 2001년 순천대 공대 전기제어공학과 졸업. 2003년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정  
Tel : 051-510-3086  
E-mail : chinwoori@hanmail.net



권 영 안(權 營 顔)

1955년 8월 29일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1991년 스위스 취리히공대(ETH) 객원교수. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.  
Tel : 051-510-2372, Fax: 051-513-0212  
E-mail : yakwon@pusan.ac.kr