

고정자 전류 기반의 모델 기준 적응 제어를 이용한 유도전동기의 센서리스 벡터제어

Sensorless Induction Motor Vector Control Using Stator Current-based MRAC

박철우*, 최병태, 권우현
(Chul-Woo Park, Byeong-Tae Choi, and Woo-Hyen Kwon)

Abstract : A novel rotor speed estimation method using Model Reference Adaptive Control(MRAC) is proposed to improve the performance of a sensorless vector controller. In the proposed method, the stator current is used as the model variable for estimating the speed. In conventional MRAC methods, the relation between the two model errors and the speed estimation error is unclear. Yet, in the proposed method, the stator current error is represented as a function of the first degree for the error value in the speed estimation. Therefore, the proposed method can produce a fast speed estimation and is robust to the parameters error. In addition, the proposed method offers a considerable improvement in the performance of a sensorless vector controller at a low speed. The superiority of the proposed method is verified by simulation and experiment in a low speed region and at a zero-speed.

Keywords : speed estimation, sensorless control, vector control, induction motor, MRAC

I. 서론

벡터제어 이론의 발달과 고성능 DSP의 발달로 유도전동기의 동적 특성을 제어할 수 있어 정밀한 서보제어 성능이 요구되는 분야에도 유도전동기를 사용하여 정확한 속도나 토크제어가 가능하게 되었다. 유도전동기를 정밀제어하기 위한 간접벡터제어에는 전동기의 속도가 필요하며, 이를 위해서 리졸버나 엔코더 같은 속도센서를 전동기의 축에 부착시켜야 한다. 그러나 속도센서로 인하여 비용이 증가하게 되고, 제어 시스템과 전동기의 연결선이 증가되어 신호선의 간섭을 유발하여 제어 시스템의 안정적인 동작을 저해할 수 있다. 또한 온도, 습도, 진동과 같은 동작 환경에 따라 정밀도가 제한되는 문제점이 있으며, 전동기 자체의 관성이나 마찰 이외의 부가적인 관성이나 마찰이 발생한다. 특히 속도센서의 부착이 불가능한 동작환경에서 정밀한 서보제어 성능이 요구될 때는 속도 센서를 사용하지 않는 센서리스 벡터제어가 필수적이다. 따라서 유도전동기의 센서리스 벡터제어가 중요한 연구 과제가 되었고, 다양한 속도 추정 알고리즘과 센서리스 제어 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다.

C. Schauder[1]는 회전자 자속을, F. Z. Peng[2]은 역기전력을 이용하여 기준함수를 만들고 모델 기준 적응 제어(Model Reference Adaptive Control: MRAC)를 이용하여 회전자 속도를 추정하였다. F. Profumo[3]는 회전자 슬롯에 의한 릴럭턴스 변화로 야기되는 전압, 전류의 고조파를 측정하여 속도를 추정하였다. H. Kubota[4]는 회전자 자속과 속도를

추정하기 위한 적응 자속 추정기를 제안하였고, Y. R. Kim[5]은 5차 확장 칼만 필터를, Y. S. Kim[6]은 Reduced 3차 확장 칼만 필터를 사용하여 회전자 속도를 추정하였다. 이러한 방법들은 모두 장점과 한계점을 가지고 있으며, 특히 저속 영역에서의 안정성, 넓은 속도 제어 범위 및 회로 변수의 변화에 대한 견실성 등 센서리스 벡터제어기에서 요구되는 모든 사항을 만족시켜주지는 못하고 있다. 그러나 이 중 MRAC를 이용한 회전자 속도 추정 방법이 설계와 해석이 비교적 쉽기 때문에 가장 많이 이용된다[7-9]. 이 방법은 회전자 속도에 대해서 독립적인 기준모델을 만들고, 또 회전자 속도에 대하여 종속적인 가변모델을 만들어 적응 제어 기법을 이용하여 전동기의 속도를 추정한다. 속도 추정을 하기 위한 MRAC 방법에는 여러 가지가 있지만, 회전자 자속과 역기전력을 기반으로 하는 방법이 많이 언급되고 있다.

본 논문에서는 센서리스 벡터제어기의 성능을 향상시키기 위해 MRAC를 이용한 새로운 회전자 속도 추정 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 속도 추정을 위한 모델변수로 고정자 전류를 이용한다. 속도 추정에 이용한 고정자 전류의 차이는 속도 추정 오차에 일차 비례하는 관계로 나타나므로 빠른 속도추정 특성을 가질 뿐만 아니라 회로변수의 변화와 측정 전압의 오차에 대해서 견실한 특성을 보이므로 저속영역과 0[rpm]에서 센서리스 벡터제어기의 성능을 향상시킬 수 있다. 그리고, 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 모의실험과 실험으로 확인한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 1. 30., 채택확정 : 2003. 5. 27.

박철우, 최병태, 권우현 : 경북대학교 전자공학과

(true@palgong.knu.ac.kr/btchoi@palgong.knu.ac.kr/whkwon@ee.knu.ac.kr)

※ 본 논문은 2002년도 경북대학교 특성화사업팀(KNURT) 연구비에 의하여 연구되었음.

II. 본론

1. 센서리스 벡터제어

유도전동기의 출력토크를 선형제어하기 위한 벡터제어는 회전자 자속의 위치를 직접 측정하거나 추정하여 전동기 내에서 자속전류와 토크전류를 분리시켜 제어하는 방법이

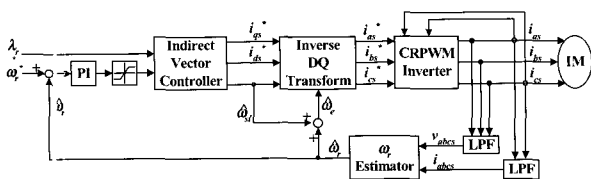


그림 1. 유도전동기의 센서리스 벡터제어 블록도.
Fig. 1. Block diagram of sensorless induction motor vector control.

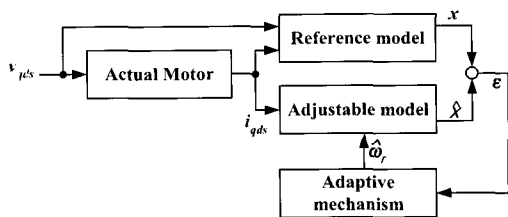


그림 2. MRAC를 이용한 회전자 속도 추정 구조.
Fig. 2. Rotor speed estimation structure using MRAC.

다. 네터제어를 하기 위해서는 회전자 자속의 위치를 정확히 아는 것이 중요하다. 일반적인 벡터제어에서는 회전자 축에 부착된 속도센서로 측정된 전동기의 속도를 이용하여 간접적으로 회전자 자속의 위치를 추정한다. 속도센서가 있는 벡터제어 시스템은 정밀한 서보제어가 가능하지만, 속도센서로 인하여 여러가지 문제점이 발생한다. 속도센서는 일반적으로 전자회로가 내장되어 있으므로 온도 환경에 따른 사용상의 제약을 받게 되고, 전동기의 양쪽 축을 모두 사용하는 경우나 전동기의 설치장소의 제약으로 길이나 부피가 제한되는 경우에는 속도센서를 전동기 축에 부착할 수 없다. 그리고, 커플링된 부분과 속도센서 자체가 충격에 약하기 때문에 전체적인 시스템의 신뢰도를 저하시킬 수 있다. 따라서 속도센서를 별도로 부착하지 않고 토크제어를 가능하게 하는 센서리스 벡터제어가 중요한 연구과제가 되었다. 지금까지 속도추정을 위해 많은 방법들이 제안되었지만, 그 중에서 MRAC를 이용한 방법이 간단하고 구현하기 쉽다는 장점이 있기 때문에 많이 이용되고 있다[7-9]. 그림 1은 유도전동기의 센서리스 벡터제어 블록도로서 단자 전압과 전류를 측정하여 전동기의 속도를 추정하고 벡터제어에 이용한다.

2. MRAC를 이용한 회전자 속도 추정방법

MRAC를 이용한 방법에서는 회전자 속도에 독립적인 기준모델과 종속적인 가변모델을 만들고 이들의 출력을 이용하여 전동기의 속도를 추정한다. 기준모델은 회전자 속도와는 무관하게 단자 전압과 전류로부터 모델의 출력값을 계산하고, 가변모델은 추정한 속도를 이용하여 모델의 출력값을 계산한다. 이 두 모델의 출력값으로 오차신호를 구성한 후 적응제어기법을 적용하여 가변모델에 이용되는 회전자 속도를 가변하면 실제 회전자 속도를 추정할 수 있다. 그림 2에 MRAC를 이용한 회전자 속도 추정 구조를 나타내었다. MRAC를 이용한 회전자 속도 추정 방법은 모델의 출력값에 따라 여러 가지로 분류할 수 있지만, 그 중에서 C.

표 1. 논문에서 사용되는 기호.

Table 1. The symbols used in the current paper.

$v_s = [v_{qs} \ v_{ds}]^T$	고정자 전압 벡터	R_s, R_r	고정자, 회전자 저항
$i_s = [i_{qs} \ i_{ds}]^T$	고정자 전류 벡터	L_s, L_r, L_m	고정자, 회전자, 상호 인덕턴스
$\lambda_r = [\lambda_{qr} \ \lambda_{dr}]^T$	회전자 자속 벡터	$T_r = L_r/R_r$	회전자 시정수
$e = [e_q \ e_d]^T$	역기전력 벡터	ω_r	회전자 속도
$\sigma = L_s - (L_m^2/L_r L_s)$	누설계수	p	미분 연산자

Schauder가 제안한 회전자 자속을 기반으로 한 방법[1] 과 F. Z. Peng이 제안한 역기전력을 기반으로 방법[2]이 가장 많이 이용되고 있다. 본 논문에서 사용되는 기호를 표1에 나타내었다.

2.1. 회전자 자속을 이용한 MRAC

C. Schauder[1]는 회전자 속도를 추정하기 위해 회전자 자속 모델을 이용하였다. 회전자 자속을 이용한 MRAC에서 기준모델과 가변모델에 이용되는 식은

$$p\lambda_r = \frac{L_r}{L_m}(v_s - R_s i_s - \sigma p i_s) \tag{1}$$

$$p\lambda_r = j \hat{\omega}_r \lambda_r - \frac{1}{T_r} \lambda_r + \frac{L_m}{T_r} i_s \tag{2}$$

와 같다. (1)은 기준모델을 나타내고, 전동기 속도에 독립적인 회전자 자속 λ_r 을 구할 수 있다. (2)는 가변모델로, 전동기의 속도에 종속적인 회전자 자속 λ_r 을 계산한다. 기준모델에서 계산한 회전자 자속과 가변모델에서 계산한 회전자 자속이 일치할 때 가변모델의 회전자 속도가 실제 전동기의 속도가 된다. 이 방법으로 회전자 속도를 추정하는 식은 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_r = K_p(\lambda_{qr} \lambda_{dr} - \lambda_{dr} \lambda_{qr}) + K_I \int (\lambda_{qr} \lambda_{dr} - \lambda_{dr} \lambda_{qr}) dt \tag{3}$$

회전자 자속을 이용한 MRAC 방법은 간단하고 구현하기 쉽다는 장점이 있지만, 저속영역에서 회전자 자속을 추정할 때 전압, 전류의 측정시 발생하는 옵셋신호 및 적분기의 표류에 따른 영향이 크게 나타나는 문제점을 가진다.

2.2. 역기전력을 이용한 MRAC

F. Z. Peng[2]은 회전자 자속 대신에 역기전력 모델을 사용하여 기준모델에서 적분기를 사용하지 않는 구조를 제안하였다. 기준모델과 가변모델에서 역기전력을 구하기 위해 사용되는 식은

$$e = v_s - R_s i_s - \sigma p i_s \tag{4}$$

$$\hat{e} = \frac{L_m}{L_r} [j \hat{\omega}_r (L_m i_s + L_r i_r) - R_r i_r] \tag{5}$$

와 같다. 여기서 e 는 기준모델을 이용하여 계산한 역기전력, \hat{e} 은 가변모델을 이용하여 계산한 역기전력을 나타낸

다. 이 방법에서 회전자 속도는 (6)을 이용하여 추정할 수 있다.

$$\hat{\omega}_r = K_p(e_q \hat{e}_d - e_d \hat{e}_q) + K_I \int (e_q \hat{e}_d - e_d \hat{e}_q) dt \quad (6)$$

회전자 자속, 역기전력 등을 이용하는 MRAC 회전자 속도 추정 방법은 기준모델과 가변모델의 외적으로 구성된 오차신호와 회전자 속도 추정 오차 사이에 명확한 관계가 주어지지 않기 때문에 MRAC 제어에 비선형 이득을 가져 오는 단점이 있고, 특히 센서리스 벡터제어시 저속영역과 0[rpm]에서 비선형 이득이 증가하여 속도 추정이 어려워지는 문제점이 있다[7-9].

3. 제안하는 고정자 전류 기반의 속도 추정 방법

본 논문에서는 해석과 설계가 비교적 간단한 MRAC를 이용하여 회전자 속도를 추정하는 새로운 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 속도 추정을 위한 모델 변수로 고정자 전류를 이용한다. 고정자 전류의 오차에서 회전자 속도를 구하는 과정은 다음과 같다.

우선, 정지좌표계에서 회전자 자속은

$$\lambda_{qr} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt - \sigma i_{qs} \right] \quad (7)$$

$$\lambda_{dr} = \frac{L_r}{L_m} \left[\int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt - \sigma i_{ds} \right] \quad (8)$$

과 같이 표현할 수 있다. 그리고, 유도전동기의 방정식에서 고정자 전류를 회전자 자속과 속도를 이용하여 정리하면

$$i_{qs} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{qr} - \omega_r T_r \lambda_{dr}) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{qr} \quad (9)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{dr} + \omega_r T_r \lambda_{qr}) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{dr} \quad (10)$$

과 같이 나타낼 수 있다. (9), (10)에서 구한 회전자 자속과 회전자 속도 추정치 $\hat{\omega}_r$ 을 이용하여 고정자 전류를 추정하면

$$\hat{i}_{qs} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{qr} - \hat{\omega}_r T_r \lambda_{dr}) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{qr} \quad (11)$$

$$\hat{i}_{ds} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{dr} + \hat{\omega}_r T_r \lambda_{qr}) + \frac{T_r}{L_m} p \lambda_{dr} \quad (12)$$

와 같이 표현된다. 실제 고정자 전류와 추정된 고정자 전류 사이의 관계에서 회전자 속도를 추정하기 위하여 고정자 전류의 차이를 정리하면

$$\hat{i}_{qs} - i_{qs} = \frac{T_r}{L_m} \lambda_{dr} (\omega_r - \hat{\omega}_r) \quad (13)$$

$$i_{ds} - \hat{i}_{ds} = \frac{T_r}{L_m} \lambda_{qr} (\omega_r - \hat{\omega}_r) \quad (14)$$

와 같다. (13), (14)에서 Q축, D축 고정자 전류의 차이가 회전자 속도 추정 오차와 회전자 자속의 함수로 나타나므로 고정자 전류의 차이를 회전자 자속으로 나누면 회전자 속도 추정 오차로 표현된다. 그러나, 순시적으로 변화하는 회

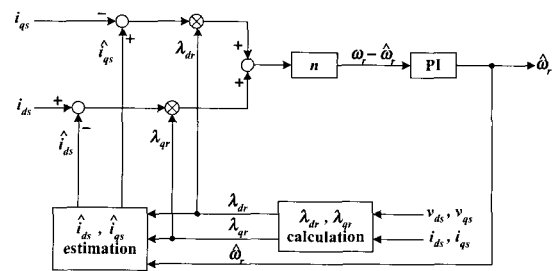


그림 3. 제안한 회전자 속도 추정 구조.

Fig. 3. Configuration of the proposed speed estimation scheme.

전자 자속값 대신 일정하게 유지되는 회전자 자속의 크기를 이용하기 위해서 (13)에 λ_{dr} 을 곱하고, (14)에 λ_{qr} 을 곱하여 더하면

$$\begin{aligned} & (\hat{i}_{qs} - i_{qs})\lambda_{dr} + (i_{ds} - \hat{i}_{ds})\lambda_{qr} \\ &= \frac{T_r}{L_m} (\omega_r - \hat{\omega}_r) [(\lambda_{qr})^2 + (\lambda_{dr})^2] \end{aligned} \quad (15)$$

와 같이 표현된다. (15)를 회전자 속도의 오차에 대해 정리하면

$$\omega_r - \hat{\omega}_r = n [(\hat{i}_{qs} - i_{qs})\lambda_{dr} + (i_{ds} - \hat{i}_{ds})\lambda_{qr}] \quad (16)$$

과 같고, $n = \frac{L_m}{T_r} \frac{1}{(\lambda_{qr})^2 + (\lambda_{dr})^2} \approx \frac{R_r}{(\lambda_{qr})^2 + (\lambda_{dr})^2}$ 이다.

(16)을 이용하면 고정자 전류와 회전자 자속으로부터 속도 추정오차를 계산할 수 있고, 속도 추정오차를 적절한 비례이득 및 적분이득을 가지는 PI제어기에 인가하면 PI제어기는 입력 값인 속도 추정오차를 0으로 만드는 방향으로 출력 값인 속도 추정치를 제어하게 된다. 따라서, PI제어기의 출력 값, 즉 속도 추정치는 실제 회전자 속도를 추정할 수 있다. (16)에서 회전자 자속의 크기는 일반적으로 일정하게 유지되고, 약제자 영역에서 벡터제어가 되더라도 감소할 뿐이지 0이 되지는 않는다. 그리고, 회전자 저항의 변화를 무시할 수 있거나, 회전자 저항 보상 알고리즘을 이용하여 회전자 저항을 보상하는 경우라면, 제안한 방법은 (16)에서와 같이 고정자 전류의 오차가 회전자 속도의 오차에 대하여 일차함수의 형태로 나타나므로 빠른 수렴특성과 정확한 속도 추정특성을 가진다. 그림 3에는 제안한 속도 추정 구조를 나타내었다.

4. 모의실험

MATLAB의 SIMULINK를 사용해 유도전동기 및 벡터제어기를 모델링한 후 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 이용하여 센서리스 벡터제어기의 모의실험을 수행하였다. 표 2는 모의실험과 실험에서 사용한 유도전동기의 회로변수들이다.

그림 4는 제안한 방법을 이용하여 센서리스 벡터제어를 수행했을 때 속도 파형을 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 속도 제어기에 인가되는 속도 명령치이다. 초기에 회전자 자속의 크기가 주어진 자속 명령치인 0.32[Wb]에 도달할 때 까지 속도 명령치를 0[rpm]으로 인가하였고, 그 이후부터는

표 2. 모의실험과 실험에 사용된 유도전동기 회로변수.

Table 2. Parameters of induction motor used in simulation and experiment.

정격출력	1[Hp]	고정자 저항	2.5[Ω]
정격전압	220[V]	회전자 저항	1.95[Ω]
정격전류	3[A]	고정자 누설 인덕턴스	7.5[mH]
정기주파수	60[Hz]	회전자 누설 인덕턴스	7.5[mH]
극수	4	상호 인덕턴스	160[mH]

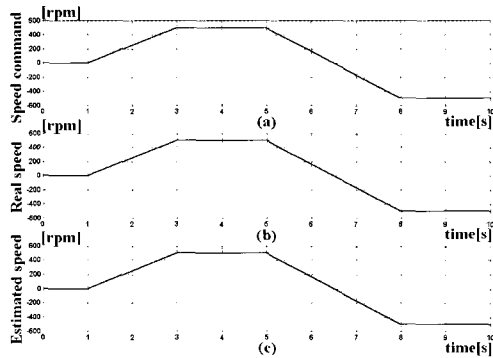


그림 4. 제안한 방법을 이용한 센서리스 제어시 속도 파형 (a) 속도 명령치 (b) 실제 회전자 속도 (c) 추정된 회전자 속도.

Fig. 4. Speed waveform of sensorless control using the proposed method, (a) speed reference, (b) real rotor speed, (c) estimated rotor speed.

500[rpm]과 -500[rpm]을 사다리꼴 형태로 인가하였다. 그림 4(b)에는 실제 회전자 속도를, 그림 4(c)에는 제안한 방법을 이용하여 추정된 회전자 속도를 나타내었다. 정역회전, 저속영역과 0[rpm]을 통과하는 부분 등 모든 부분에서 추정된 회전자 속도인 그림 4(c)가 실제 회전자 속도인 그림 4(b)와 일치하는 것을 볼 수 있고, 그림 4(a)에서 나타낸 속도 명령치를 정확히 추종하는 것을 볼 수 있다.

그림 5~7에서는 기존의 회전자 자속을 이용한 MRAC 방법, 역기전력을 이용한 MRAC 방법과 제안한 고정자 전류를 이용한 MRAC 방법의 회로변수의 변화에 대한 강인함을 모의실험하였다. 속도명령 500[rpm], 부하토크 1[Nm], 자속 명령치 0.32[Wb]인 상태에서 센서리스 벡터제어를 수행하였고, 일정 시간이 지난 후 속도가 정상상태에 도달하였을 때 벡터제어와 속도추정에 이용되는 회로변수를 100% 증가시켰다. 이때 강인함을 조사하는 회로변수 이외의 모든 회로변수는 고정된 값을 사용하였다.

그림 5에는 고정자 저항을 100% 증가시켰을 때 실제 전동기의 속도와 추정하는 속도 사이의 오차를 나타내었다. 그림 5(a)와 5(b)에서 회전자 자속과 역기전력을 이용한 방법은 약 9[rpm]의 속도추정 오차가 발생하는 것을 볼 수 있지만, 그림 5(c)의 제안한 방법에서는 약 5[rpm]의 속도추정 오차가 발생하는 것으로 고정자 저항의 변화에 대해서는 제안한 방법이 기존의 방법에 비해서 강인한 것을 알 수 있다. 그리고, 고정자 저항의 오차는 상대적으로 저속영역

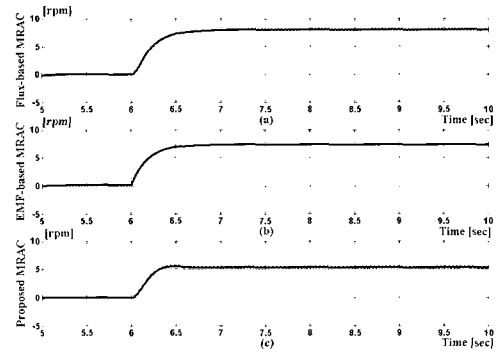


그림 5. 고정자 저항을 100% 변화 시켰을 때 속도 추정 오차 (a) 회전자 자속을 이용한 MRAC (b) 역기전력을 이용한 MRAC (c) 제안한 MRAC.

Fig. 5. Speed estimation error when the stator resistance is increased to 100%, (a) rotor flux based MRAC, (b) back EMF based MRAC, (c) proposed MRAC.

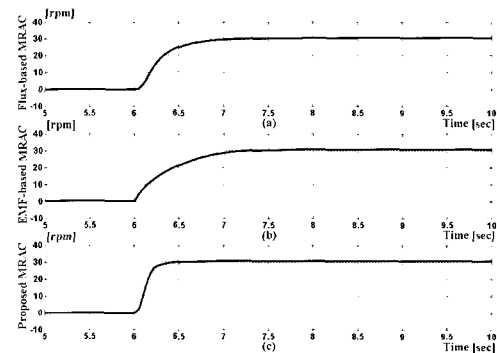


그림 6. 회전자 시정수를 100% 변화 시켰을 때 속도 추정 오차 (a) 회전자 자속을 이용한 MRAC (b) 역기전력을 이용한 MRAC (c) 제안한 MRAC.

Fig. 6. Speed estimation error when the rotor time constant is increased to 100%, (a) rotor flux based MRAC, (b) back EMF based MRAC, (c) proposed MRAC.

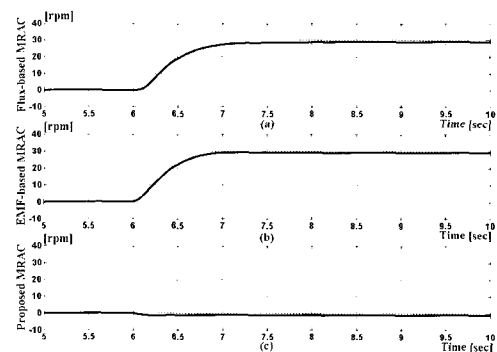


그림 7. 상호 인덕턴스를 100% 변화 시켰을 때 속도 추정 오차 (a) 회전자 자속을 이용한 MRAC (b) 역기전력을 이용한 MRAC (c) 제안한 MRAC.

Fig. 7. Speed estimation error when the mutual inductance is increased to 100%, (a) rotor flux based MRAC, (b) back EMF based MRAC, (c) proposed MRAC.

에서 큰 영향을 미치게 되므로 제안한 방법은 센서리스 벡터제어기의 저속 성능을 향상시킬 수 있다.

그림 6에는 회전자 시정수를 100% 증가시켰을 때 속도 추정 오차를 나타내었다. 회전자 시정수의 변화에 대해서는 기존의 방법과 제안한 방법 모두 약 30[rpm]정도의 오차가 발생하는 것을 볼 수 있고, 비교하는 세 가지 속도 추정 방법이 회전자 시정수의 변화에 대해서는 비슷한 강인함을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 7에는 상호 인덕턴스를 100% 증가시켰을 때 속도 추정 오차를 나타내었다. 그림 7(a)와 7(b)에서 기존의 방법은 30[rpm]정도 속도 추정 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 그림 7(c)의 제안한 방법에서는 2[rpm]정도의 오차만이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 상호 인덕턴스의 변화에 대해서는 제안한 방법이 기존의 방법에 비해서 매우 강인한 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

5. 실험

제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 그림 8과 같은 유도전동기 벡터제어 시스템을 구성하였다. 시스템은 TMS320C32를 이용한 DSP보드, 속도 검출을 위한 1024PPR의 엔코더, 단자 전압과 전류의 검출을 위한 12비트 A/D 변환기, 유도전동기와 이를 구동하기 위한 인버터, 그리고 부하로 사용하는 직류전동기 등으로 구성되어 있다.

기존의 방법과 제안한 방법의 고속, 저속에서 속도추정 성능을 비교하기 위해서 센서리스 속도제어기를 구성하고 실험을 하였다.

그림 9~12는 500[rpm]과 1000[rpm]에서 기존의 방법과 제안한 방법의 성능을 비교하였다. 그림 9에는 속도제어기에 인가되는 속도 명령치로, 500[rpm]과 1000[rpm]이 사다리꼴 형태로 반복하여 속도명령으로 인가된다. 그림 10~12는 각각 회전자 자속 기반의 MRAC, 역기전력 기반의

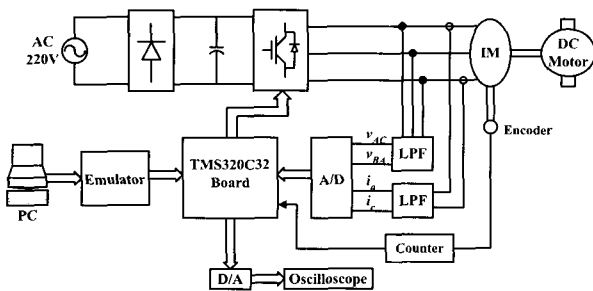


그림 8. 유도전동기 벡터제어 시스템의 블록도.
Fig. 8. Block diagram of induction motor vector control system.

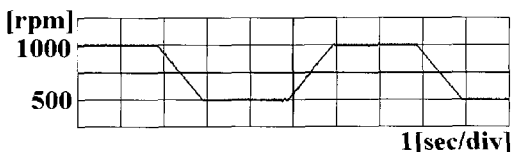


그림 9. 서리스 벡터제어기의 속도 명령치.
Fig. 9. Speed reference of sensorless vector controller.

MRAC, 제안한 MRAC를 이용해서 센서리스 속도제어를 수행했을 때 엔코더를 이용하여 관측한 실제 속도와 추정된 속도를 나타내었다. 그림 10~12에서 추정된 속도가 실제 속도와 일치하고, 속도 명령치를 정확히 추종하는 것으로 500[rpm]과 1000[rpm]에서는 센서리스 속도제어가 원활히 수행되는 것을 알 수 있다.

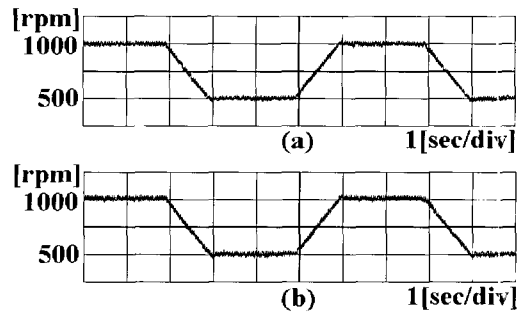


그림 10. 회전자 자속 기반의 MRAC를 이용한 센서리스 벡터제어 (a) 실제 회전자 속도 (b) 추정된 회전자 속도.

Fig. 10. Sensorless vector control using rotor flux based MRAC, (a) real rotor speed, (b) estimated rotor speed.

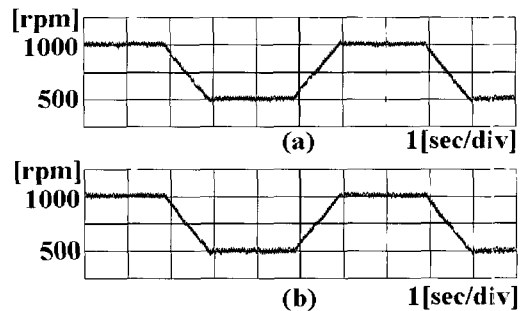


그림 11. 역기전력 기반의 MRAC를 이용한 센서리스 벡터제어 (a) 실제 회전자 속도 (b) 추정된 회전자 속도.

Fig. 11. Sensorless vector control using back EMF based MRAC, (a) real rotor speed, (b) estimated rotor speed.

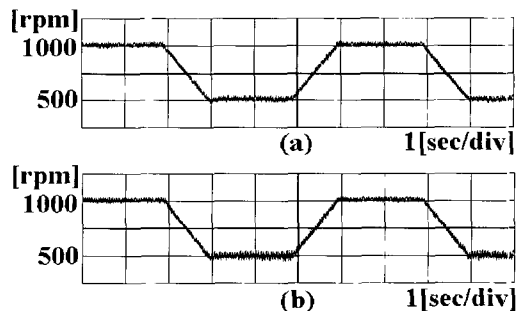


그림 12. 제안한 MRAC를 이용한 센서리스 벡터제어 (a) 실제 회전자 속도 (b) 추정된 회전자 속도.

Fig. 12. Sensorless vector control using the proposed MRAC, (a) real rotor speed, (b) estimated rotor speed.

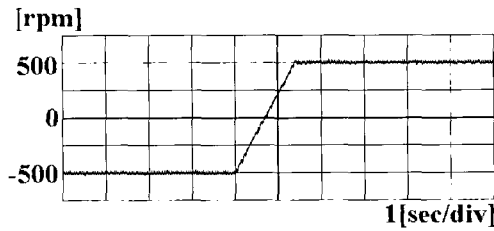


그림 13. 센서리스 벡터제어의 속도 명령치.
Fig. 13. Speed reference of sensorless vector controller.

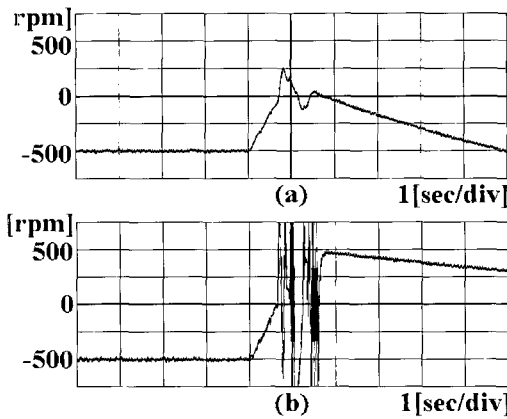


그림 14. 회전자 자속 기반의 MRAC를 이용한 센서리스 벡터제어 (a) 실제 회전자 속도 (b) 추정된 회전자 속도.
Fig. 14. Sensorless vector control using the rotor flux based MRAC, (a) real rotor speed, (b) estimated rotor speed.

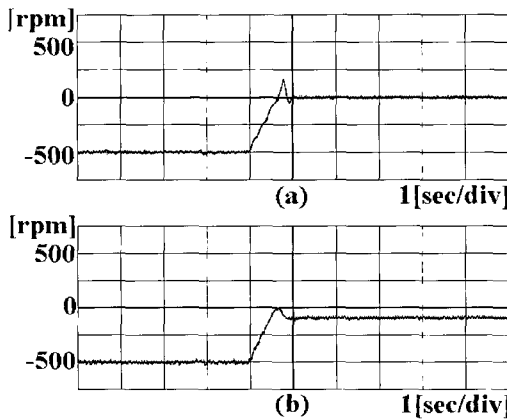


그림 15. 역기전력 기반의 MRAC를 이용한 센서리스 벡터제어 (a) 실제 회전자 속도 (b) 추정된 회전자 속도.
Fig. 15. Sensorless vector control using the back EMF based MRAC, (a) real rotor speed, (b) estimated rotor speed.

그림 13~16은 -500[rpm]과 500[rpm]의 속도명령을 인가하여 0[rpm]을 통과하는 부분에서 기존의 방법과 제안한 방법의 속도 추정 성능을 비교하였다. 그림 13에는 속도제어기가 인가되는 속도 명령치를 나타내었고, -500[rpm]과

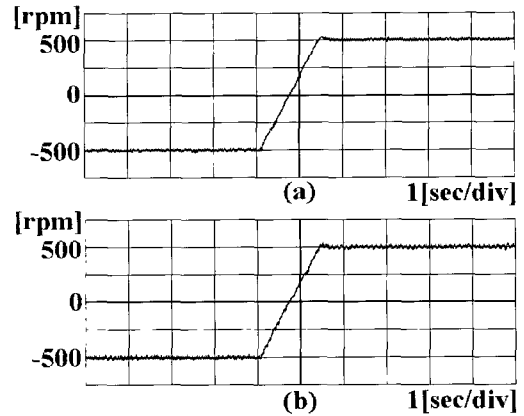


그림 16. 제안한 MRAC를 이용한 센서리스 벡터제어 (a) 실제 회전자 속도 (b) 추정된 회전자 속도.
Fig. 16. Sensorless vector control using the proposed MRAC, (a) real rotor speed, (b) estimated rotor speed.

500[rpm]이 사다리꼴 형태로 인가된다.

그림 14에는 회전자 자속 기반의 MRAC를 이용해서 센서리스 속도제어를 수행했을 때 실제 속도와 추정된 속도를 나타내었고, 그림 15에는 역기전력 기반의 MRAC를 이용했을 때의 파형을 나타내었다. 그림 14(b)와 15(b)에서 초기에 -500[rpm]이 속도 명령으로 인가될 때는 센서리스 벡터제어가 수행되는 것을 볼 수 있다. 그러나, 회전자 속도가 0[rpm]을 통과하는 부분에서는 속도 추정이 전혀 되지 않는 것을 볼 수 있고, 그림 14(a)와 15(a)에서 실제 회전자 속도도 속도 명령치를 추종하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그림 16에는 제안한 방법을 이용해서 센서리스 벡터제어를 수행한 경우의 실제 속도와 추정된 속도를 나타내었다. 기존의 방법과는 다르게 0[rpm]을 통과하는 부분에서 회전자 속도가 정확히 추정되는 것을 그림 16(b)에서 볼 수 있고, 정역회전 속도 명령치를 정확히 추종하는 것을 그림 16(a)에서 볼 수 있다. 회전자 자속 기반의 MRAC와 역기전력 기반의 MRAC를 이용한 센서리스 벡터제어기가 저속영역과 0[rpm]에서 속도를 추정하지 못하는 것은 알려져 있는 사항으로서 이를 실험으로 확인할 수 있고, 제안한 방법을 이용했을 경우에 이 문제를 확실하게 해결할 수 있음을 알 수 있다.

그림 17에는 100[rpm]과 0[rpm]에서 제안한 방법을 이용하여 센서리스 벡터제어를 수행한 경우의 파형을 나타내었다. 그림 17(a)에는 속도제어기에 인가되는 속도 명령치를 나타내었고, 그림 17(c)에서 0[rpm]이 계속 유지되는 상황에도 속도 추정이 되는 것을 볼 수 있다. 그림 17(b)에 나타난 실제 회전자 속도가 속도 명령치와 일치하는 것으로 제안한 MRAC 방법을 이용하면 기존의 MRAC 방법으로는 속도 추정이 어려운 저속, 0[rpm]에서 센서리스 벡터제어기의 성능을 향상시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 18~20에는 기존의 방법과 제안한 방법에서 회로변수의 변화에 대한 강인함을 실험적으로 비교하였다. 모의실험의 경우와 동일한 조건인 속도명령 500[rpm], 부하토크

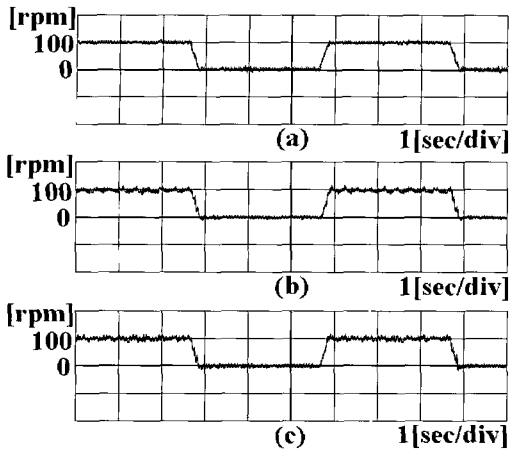


그림 17. 제안한 방법을 이용한 센서리스 속도제어 (a) 속도명령치 (b) 실제 회전자 속도 (c) 추정된 회전자 속도.

Fig. 17. Sensorless vector control using the proposed MRAC, (a) speed reference, (b) real rotor speed, (c) estimated rotor speed.

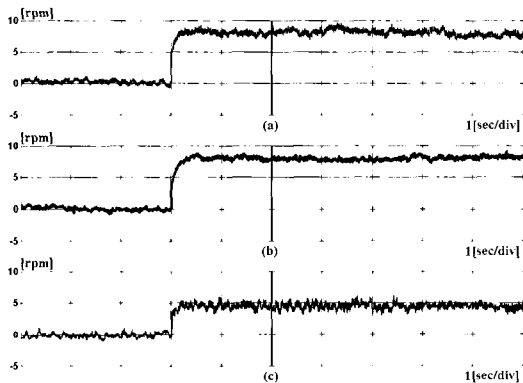


그림 18. 고정자 저항을 100% 변화 시켰을 때 속도추정 오차 (a) 회전자 자속을 이용한 MRAC (b) 역기전력을 이용한 MRAC (c) 제안한 MRAC.

Fig. 18. Speed estimation error when the stator resistance is increased to 100%, (a) rotor flux based MRAC, (b) back EMF based MRAC, (c) proposed MRAC.

1[Nm], 자속 명령치 0.32[Wb]인 상태에서 센서리스 벡터제어를 수행하였고, 일정시간이 지난 후 속도가 정상상태에 도달하였을 때 벡터제어와 속도추정에 이용되는 회로변수를 100% 증가시켰다. 그리고, 속도 센서를 이용하여 측정된 실제 회전자 속도와 추정하는 회전자 속도의 오차를 나타내었다. 여기서 조사하는 회로변수 이외의 모든 회로변수는 고정된 값을 이용하였고, 엔코더를 이용하여 측정된 실제 회전자 속도는 벡터제어에 이용하지 않고 관측하기 위한 용도로만 이용하였다. 그림 18에는 고정자 저항을 변화시켰을 때 속도 추정 오차를 나타내었다. 그림 18(a)와 18(b)에서 기존의 방법은 8[rpm] 정도의 속도 추정 오차가 발생하고, 그림 18(c)의 제안한 방법은 약 5[rpm] 정도의 속도 추정 오차가 발생하였다. 따라서 고정자 저항의 변화에

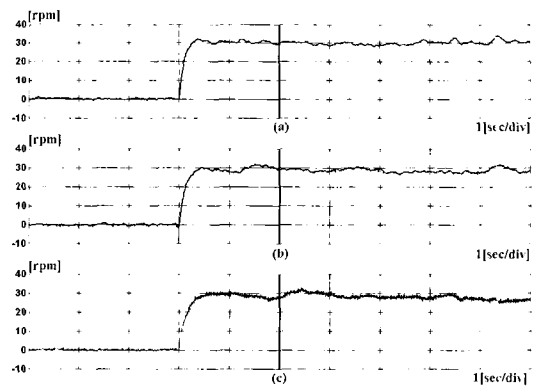


그림 19. 회전자 시정수를 100% 변화 시켰을 때 속도 추정 오차 (a) 회전자 자속을 이용한 MRAC (b) 역기전력을 이용한 MRAC (c) 제안한 MRAC.

Fig. 19. Speed estimation error when the rotor time constant is increased to 100%, (a) rotor flux based MRAC, (b) back EMF based MRAC, (c) proposed MRAC.

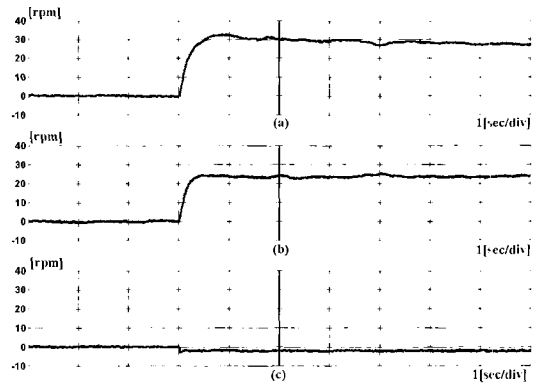


그림 20. 상호 인덕턴스를 100% 변화 시켰을 때 속도 추정 오차 (a) 회전자 자속을 이용한 MRAC (b) 역기전력을 이용한 MRAC (c) 제안한 MRAC.

Fig. 20. Speed estimation error when the mutual inductance is increased to 100%, (a) rotor flux based MRAC, (b) back EMF based MRAC, (c) proposed MRAC.

대해서는 제안한 방법이 기존의 방법에 비해서 강인한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 19에는 회전자 시정수를 100% 증가 시켰을 때 속도 추정 오차를 나타내었다. 그림 19(c)에 나타난 제안한 방법의 속도 추정 오차가 그림 19(a)와 19(b)에 나타난 기존의 MRAC방법의 속도 추정 오차와 비슷한 크기를 나타내는 것으로 회전자 시정수의 변화에 대한 제안한 방법과 기존의 MRAC방법의 강인함은 유사한 것을 알 수 있다. 그림 20에는 상호 인덕턴스를 100% 증가시켰을 때 속도 추정 오차를 나타내었다. 그림 20(a)와 20(b)에서 기존의 방법에서는 상호 인덕턴스를 증가시켰을 때 약 30[rpm]의 속도 추정 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 20(c)는 제안한 방법을 이용한 경우의 파형으로, 제안한 방법에서는 속도 추정 오차가 약 2[rpm] 정도만 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 상호 인덕턴스의 변화에는 제안한 방법이 매우 강인한 특성을 나타내는 것

을 일 수 있다. 회로변수의 변화에 대한 모의실험 파형인 그림 5~7과 실험 파형인 그림 18~20의 결과로부터 제안된 방법이 신뢰할만한 특성을 가지며, 기존의 방법보다 저속영역과 회로변수 변화에 대하여 강인함을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 센서리스 벡터제어기의 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 회전자 속도 추정방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 고정자 전류를 이용한 MRAC 방법으로 회전자 속도를 추정하였다.

기존의 회전자 자속과 역기전력을 이용한 MRAC 방법에서는 기준모델과 가변모델의 오차와 속도 추정 오차와의 사이에 명확한 관계가 주어지지 않고 비선형적인 관계로 나타나는 반면에, 제안한 방법에서는 기준모델과 가변모델 사이의 고정자 전류 차이로 구성된 전류오차가 회전자 속도 추정오차와 일차비례식으로 표현된다. 또한 회로변수의 변화에 대해서 견실한 특성을 가지며, 특히 상호 인덕턴스의 오차에 대해서 대단히 강인한 특성을 보인다. 그리고, 고정자 저항의 오차에 대해서도 강인하며, 이러한 견실성으로 인하여 저속영역에서 매우 우수한 속도 추정 특성을 나타낸다.

제안한 방법의 회로변수의 변화에 대한 견실성을 기존의 MRAC 방법과 비교하였고, 모의실험과 실험을 통하여 타당성을 확인하였다. 그 결과 기존의 MRAC 방법의 문제점으로 알려진 저속영역과 0[rpm]에서 제안한 방법의 우수함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] C. Schauder, "Adaptive Speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 5, pp. 1054-1061, September/October, 1992.

- [2] F. Z. Peng and T. Fukao, "Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1234-1240, September/October, 1994.
- [3] F. Profumo, G. Griva, M. Pastorelli, and J. C. Moreira, "Universal field oriented controller based on airgap flux sensing via third harmonic stator voltage," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 2, pp. 448-455, September/October, 1994.
- [4] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1219-1224, September/October, 1994.
- [5] Y. R. Kim, S. K. Sul, and M. H. Park, "Speed sensorless vector control of an induction motor using an extended kalman filter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1225-1233, September/October, 1994.
- [6] Y. S. Kim, S. U. Kim, and I. W. Yang, "Implementation of a speed sensorless vector control of induction motor by reduced-order extended kalman filter," *IEEE-IAS Annual Meeting*, pp. 197-203, 1995.
- [7] M. N. Marwali and A. Keyhani, "A comparative study of rotor flux based MRAS and back EMF based MRAS speed estimators for speed sensorless vector control of induction machines," *IEEE-IAS Annual Meeting*, pp. 160-166, 1997.
- [8] R. Blasco-Gimenez, G. M. Asher, M. Sumner, and K. J. Bradley, "Dynamic performance limitations of MRAS based sensorless induction motor drives. Part 1: Stability analysis for the closed loop drive," *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 2, pp. 113-122, March, 1996.
- [9] Peter Vas, *Sensorless vector and direct torque control*, Oxford University Press, 1998.



박철우

1971년 12월 24일생. 1997년 경북대 전자공학과 졸업. 동 대학원 석사(1999), 1999년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 마이크로프로세서 응용제어, 전력전자.



최병태

1968년 12월 18일생. 1993년 경북대 전자공학과 졸업. 동 대학원 석사(1995), 1998년~현재 동 대학원 박사과정. 1995년~1998년 대우중공업 우주항공연구소 연구원. 관심분야는 마이크로프로세서 응용제어, 전력전자.



권우현

1953년 6월 22일생. 1977년 서강대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 석사(1979), 한국과학기술원 박사(1993). 1979년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수. 관심분야는 컴퓨터응용제어 및 전력전자, 제어계측.