

새로운 MRAS에 의한 유도전동기의 센서리스 속도제어

김덕기* · 김종수** · 김성환***

Novel MRAS Based Sensorless Speed Control of Induction Motor

D-K Kim* · J-S Kim** · S-H Kim***

Key words : Model Reference Adaptive System(MRAS : 모델기준 적응시스템), Sensorless Speed Control(센서리스 속도제어), Vector Control(벡터제어), Lag Circuit(지연 회로), Flux Estimator(자속추정기)

Abstract

In the industrial induction motor speed and torque controlled drive system, the closed loop control usually requires the measurement of speed or position of a motor. However a sensorless drive of an induction motor has several advantages ; low cost and mechanical simplicity. Thus this paper investigates a field oriented control method without speed and flux sensors. The proposed control strategy is based on the Model Reference Adaptive System(MRAS) using a new flux estimator which replaces integrators with two lag circuits as the reference model. This algorithm may overcome several shortages of conventional MRAS such as integrator problems, small EMF at low speed. The simulation and experimental results indicate good speed responses.

1. 서 론

최근 고성능 산업 응용분야에서는 벡터제어 이론에 의한 유도전동기의 운전이 널리 응용되고 있다. 이 방법은 대개 폐루프 속도제어가 요구되므로 모터의 회전속도를 정확하게 검출할 수 있는 속도 센서(pulse generator, 엔코더)를 이용하여 속도나 자속각 위치정보를 얻는다. 그러나 유도전동기에

속도센서를 부착하는 것은 여러가지 면에서 단점을 가지게 된다. 우선 유도전동기가 가지는 본래의 강인함을 약화시키고 추가적인 센서의 부착으로 가격이 상승하며 전기적 노이즈를 고려하여 케이블을 배치해야 한다. 하지만 무엇보다도 속도센서에 제어의 신뢰도가 달려 있기 때문에 전체적인 시스템의 신뢰도는 센서가 없는 경우보다 크게 떨어지게 된다.

* 한국해양대학교 대학원 기관공학과(석사과정)(원고접수일 : 2000년 5월)

** 한국해양대학교 대학원 기관공학과(박사과정)

*** 한국해양대학교 기관시스템공학부

지금까지 발표된 센서리스 제어방식들로서는, 고정자 전압 및 전류값을 측정하여 전동기 상태방정식으로부터 자속 및 회전자속도를 추정하는 방식¹¹⁻²¹, 유도전동기의 두 모델, 즉 고정자모델과 회전자모델에 의해 구한 자속이나 역기전력 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시킴으로써 속도를 추정하는 방식¹⁵⁻⁴¹, 상태관측기에 의해 회전자 자속을 추정하고 고정자전류와 회전자자속을 이용하여 속도정보를 얻는 방식¹⁵⁻⁶¹, 입출력이 잡음의 영향을 받을 경우에 최적의 필터링 알고리즘인 칼만필터를 이용하는 방식¹⁷⁻⁸¹ 및 회전자슬롯에 의한 톨릭턴스 변화로 야기되는 고정자전압이나 전류 고조파를 측정하여 속도를 추정하는 방식¹⁹⁻¹⁰¹ 등이 있다.

유도전동기의 여러가지 센서리스 속도제어 방식 중 모델기준 적용시스템(MRAS)은 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하여 비교적 폭 넓게 사용되는 제어구조의 하나이다. 그러나 종래의 MRAS는 기준모델의 회전자 자속값을 전동기의 전압방정식으로부터 구하는데 이 경우 사용되는 적분기의 offset, 포화등으로 인해 기동 및 저속시 자속추정에 문제가 야기된다.^{12,111}

본 논문에서는 MRAS의 이러한 단점을 극복하기 위하여 기동 및 저속 운전시 회전자 자속값을 추정하는 방식을 제안한다. 제안된 알고리즘은 기준모델에서는 역기전력과 자속설정치를 두 개의 지연회로에 각각 인가하여 그 합을 자속추정치로 간주하고, 비교모델에서는 회전자의 전류모델을 이용하여 회전자자속을 측정전류로부터 구하는 방식이다. 그리고 두 모델에서 관측된 회전자자속의 오차를 적응메카니즘에 적용하여 회전자속도를 추정한다.

본 논문에서 제시된 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 그 유효성을 확인하였다.

2. 유도전동기의 벡터제어시스템

유도전동기의 고속토크 응답특성을 얻기 위해서는 고정자 전류를 자속성분 전류와 토크성분 전류로 분리하여 각각을 독립적으로 제어할 수 있어야 한다. 이를 위해 고정자전류를 자속벡터에 기준

하여 제어하는데 이 기법을 벡터제어(Vector Control) 혹은 자속기준제어(Field Oriented Control : FOC)라고 한다.

벡터제어에서 자속과 토크를 독립적으로 제어하기 위해서는 제어변수들이 동기회전좌표계상에서 표현되므로 직류량이지만 실제전동기에 흐르는 전류는 정지된 고정자를 기준으로 하는 정현파 교류이므로 이 값을 동기 좌표계의 직류값으로 변환해야 한다. 벡터제어는 자속각을 얻는 방식에 따라 크게 두 가지로 분류되는데 직접벡터제어(direct vector control)와 간접벡터제어(indirect vector control)방식이 있다.¹¹²

직접벡터제어방식은 Hall 소자나 검색코일 등에 의해 공극자속을 직접 검출하거나 자속모델로부터 계산하여 회전자 자속벡터의 크기와 위치를 직접 구하는 방식이다. 자속을 홀소자나 검색코일에 의해 직접 측정하는 방법은 설치환경, 노이즈 및 비용증가 등의 문제점이 있으므로 전동기의 전압방정식으로부터 회전자의 자속각을 얻어내는 것이 일반적이다

직접벡터제어에서 자속모델로부터 회전자자속의 계산은 고정자의 전압모델 및 회전자 전류모델 등에서 가능하다.

정지좌표계에서 고정자 전압방정식으로부터 고정자 쇄교자속을 구하면 다음과 같다

$$\lambda_{cs} = \int (v_{cs} - R_s i_{cs}) dt \tag{1}$$

$$\lambda_{\beta s} = \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \tag{2}$$

단, $\lambda_{cs}, \lambda_{\beta s}$: 고정자 쇄교자속

$v_{cs}, v_{\beta s}$: 고정자 전압

$i_{cs}, i_{\beta s}$: 고정자전류

R_s : 고정자저항

또한, 회전자 쇄교자속은 아래 식에 의해 구할 수 있다.

$$\lambda_{\alpha r} = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{cs} - \sigma L_s i_{cs}) \tag{3}$$

$$\lambda_{\beta r} = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{\beta s} - \sigma L_s i_{\beta s}) \tag{4}$$

단, $\sigma (= 1 - L_m^2 / L_s L_r)$: 누설계수

$\lambda_{cs}, \lambda_{\beta s}$: 고정자쇄교자속
 $\lambda_{cr}, \lambda_{\beta r}$: 회전자쇄교자속
 L_s, L_r : 고정자 및 회전자 인덕턴스
 L_m : 상호인덕턴스

반면에, 회전자의 전류모델에서 회전자자속은 회전자 전압방정식 및 쇄교자속으로부터 다음과 같이 된다.

$$\frac{d\lambda_{cr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{cs} - \omega_r \lambda_{\beta r} - \frac{1}{T_r} \lambda_{cr} \quad (5)$$

$$\frac{d\lambda_{\beta r}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{\beta s} + \omega_r \lambda_{cr} - \frac{1}{T_r} \lambda_{\beta r} \quad (6)$$

단, $T_r (= \frac{L_r}{R_r})$: 회전자속도
 ω_r : 회전자속도

3. MRAS에 의한 유도전동기의 센서리스 속도제어

3.1 MRAS를 이용한 속도추정의 원리

일반적으로 유도전동기에서 MRAS에 의한 센서리스 속도제어는 두 추정기의 출력을 비교함으로써 회전자 속도를 얻는 방식이다.^[1]

회전자 속도값이 포함되어 있지 않은 한 추정기는 유도전동기 기준모델(Reference Model), 다른 하나는 조정모델(Adjustable Model)로 간주할 수 있다. 두 모델에 의해 구한 추정치의 차이를 적응 메카니즘에 적용시킴으로써 조정모델 및 제어를

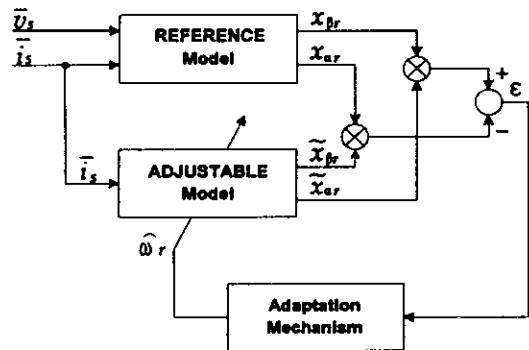


Fig. 1 The block diagram of the speed estimation for Model Reference Adaptive System (MRAS)

위한 속도추정값을 구할 수 있다. 이 방식의 속도 추정 불확도는 Fig. 1과 같다.

기준모델은 고정자 전압방정식을, 조정모델은 회전자 전압방정식을 적용한다. 각 모델에서 구한 회전자자속을 비교한 후 그 오차를 이용하여 회전자속도를 추정할 수 있다.

기준모델과 조정모델에 의한 회전자자속은 아래 식들에 의해 구할 수 있다.

$$\bar{\lambda}_r = \int \frac{L_r}{L_m} (\bar{v}_s - R_s \bar{i}_s) dt + \frac{L_m^2 - L_r L_s}{L_m} \bar{i}_s \quad (7)$$

$$\hat{\lambda}_r = \frac{1}{T_r} \int (j\omega_r T_r - 1) + \hat{\lambda}_r dt + L_m \bar{i}_s \quad (8)$$

단, v_s, i_s : 고정자 전압 및 전류

위 그림 및 식에서 “-”는 벡터량을 의미하며, “~”는 조정모델의 출력을 나타낸다.

또한, 최근에는 각 모델의 역기전력을 비교함으로써 속도추정을 하는 방식이 제안되었는데, 이것은 적분기를 사용할 필요가 없다는 이점이 있다. 각 모델의 역기전력은 식(9), (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{e} = \bar{v}_s - R_s \bar{i}_s - \alpha L_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} \quad (9)$$

$$\hat{e} = \frac{L_m^2}{L_r} \left[j\omega_r \left(\bar{i}_s + \frac{L_r}{L_m} \bar{i}_r \right) - \frac{R_r}{L_m} \bar{i}_r \right] \quad (10)$$

단, e : 역기전력

위의 두 경우 모두 회전자속도는 아래와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\omega}_r = K_p (x_{\beta} \bar{x}_{\alpha r} - x_{\alpha} \bar{x}_{\beta r}) + K_I \int (x_{\beta} \bar{x}_{\alpha r} - x_{\alpha} \bar{x}_{\beta r}) dt \quad (11)$$

여기서, $x_{\alpha}, x_{\beta}, \bar{x}_{\alpha}, \bar{x}_{\beta}$ 는 각각 기준모델 및 조정모델의 회전자자속 또는 역기전력이며, K_p, K_I 는 비례 및 적분상수이다.

3.2 본 논문에서 제안하는 새로운 MRAS에 의한 센서리스 속도제어

유도전동기의 센서리스 속도제어에서 MRAS 방식은 많은 장점에도 불구하고 상기한 방정식으로부터 회전자자속을 추정하는데 있어서 적분기의 포화, 표류 및 저속시 역기전력 계산에 따른 문제

가 야기되는 단점을 가진다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위하여 두 모델에 필터를 삽입하거나 모델의 출력물리량을 회전자자속이 아닌 역기전력 또는 순시무효전력을 사용하는 대안이 제시되기도 한다.^[4,11] 그러나 이러한 물리량도 저속에서 문제가 야기되고 MRAS 제어에 비선형 이득을 가져오는 단점을 가진다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 MRAS의 기준모델로 사용되는 고정자 전압모델 대신, 역기전력과 회전자 자속 설정치를 각각 1차 지연회로에 인가하여 그 합을 저속 및 기동시의 회전자 자속값으로 간주하였다.

본 논문에서 제안하는 상태관측기에 의한 자속 추정치는 다음 식과 같다.

$$\lambda_r = \frac{T_L}{1+T_L P} \dot{\bar{e}} + \frac{1}{1+T_L P} \lambda_r^* \quad (12)$$

단, $p (= \frac{d}{dt})$: 미분연산자

λ_r^* : 회전자자속 설정치

T_L : 지연회로의 시정수

Fig. 2는 앞에서 기술한 2개의 1차 지연회로에 의한 자속추정 페이지도로서 실제값에 근접한 회전자 자속의 추정이 가능함을 볼 수 있다.

Fig. 3은 두 개의 지연회로를 사용하여 그 합을 회전자 자속으로 추정하는 상태관측기 블록도이며, Fig. 4는 조정모델인 회전자 전류모델과 적응메카니즘의 블록도를 나타낸다.

Fig. 5는 본 논문에서 제시한 회전자 속도추정

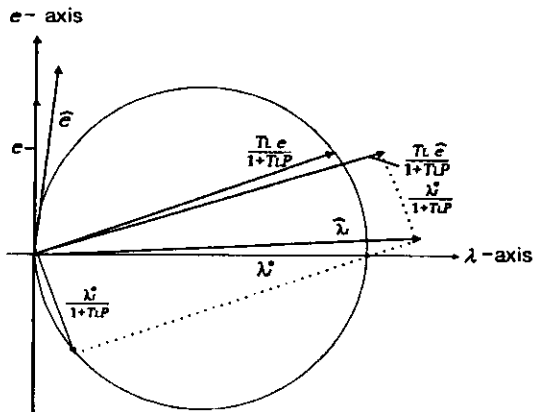


Fig. 2 The Phasor diagram of the proposed flux estimator

블록도이다.

본 방식에서 적응메카니즘에 의한 회전자 속도는 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\omega}_r = K_p(\lambda_{pr}\bar{\lambda}_{cr} - \lambda_{cr}\bar{\lambda}_{pr}) + K_I \int (\lambda_{pr}\bar{\lambda}_{cr} - \lambda_{cr}\bar{\lambda}_{pr}) dt \quad (13)$$

벡터제어를 위해서는 슬립지령속도가 식(14)와 같아야 하므로 자속각은 식(15)가 된다. 즉 식(15)

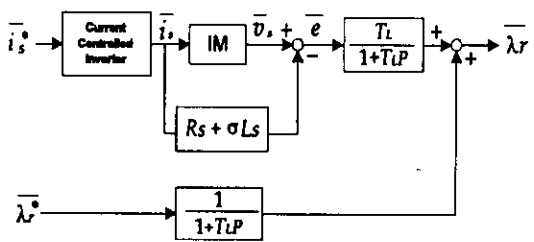


Fig. 3 The block diagram of the rotor

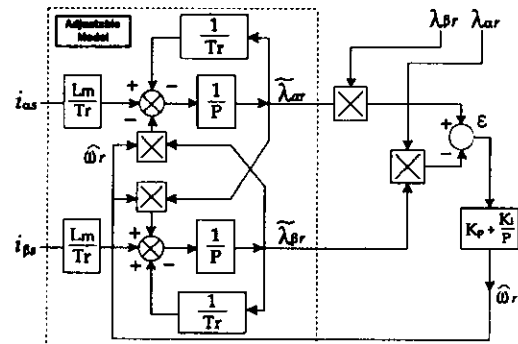


Fig. 4 The block diagram of the Adjustable Model and Adaptation Mechanism

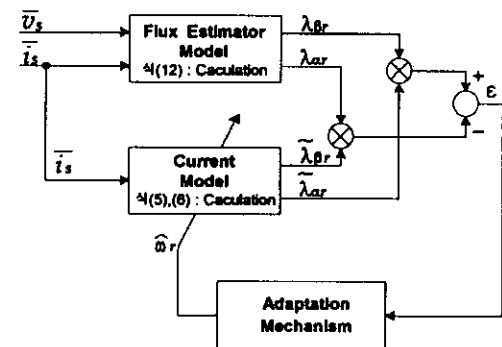


Fig. 5 The block diagram of the speed estimation for novel Model Reference Adaptive System(MRAS)

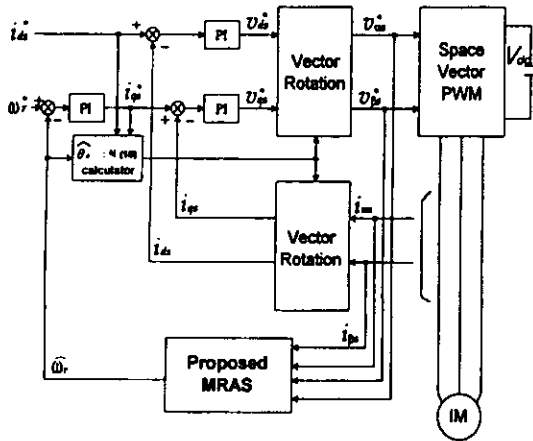


Fig. 6 Configuration of overall system

는 좌표변환을 위한 동기회전자속각이다.

$$\omega_{sl} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}^*}{i_{ds}^*} \quad (14)$$

단, ω_{sl} : 슬립지령속도

i_{ds}^* : 자속성분전류

i_{qs}^* : 토크성분전류

$$\hat{\theta}_e = \int (\hat{\omega}_r + \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}^*}{i_{ds}^*}) dt \quad (15)$$

본 논문에서 제시한 센서리스 속도제어 시스템의 전체구성은 Fig. 6과 같다.

식(15)에 의해 자속각을 계산한 후 고정자전류 (i_{ds} , i_{qs})를 동기회전좌표계상의 값(i_{ds}^* , i_{qs}^*)으로 변환한다.

일정자속제어를 위한 자속전류지령치(i_{ds}^*)와, 지령속도(ω_r)와 추정속도($\hat{\omega}_r$)의 차이를 PI 알고리즘에 적용하여 얻은 토크전류지령치(i_{qs}^*)를 실제 전류값(i_{ds} , i_{qs})과 비교하여 동기회전좌표계상의 지령전압(v_{ds}^* , v_{qs}^*)을 얻어 이를 고정좌표계 지령전압(v_{as} , v_{bs})으로 변환하여 전동기의 각 상에 인가한다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 모델기준 적용시스템의 센서리스 속도제어방식의 타당성을 고찰하기 위해 실험에 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

Fig. 7~Fig. 9는 지령속도가 무부하에서 15, 50, 500[rpm]의 계단속도지령에 대한 컴퓨터 시뮬

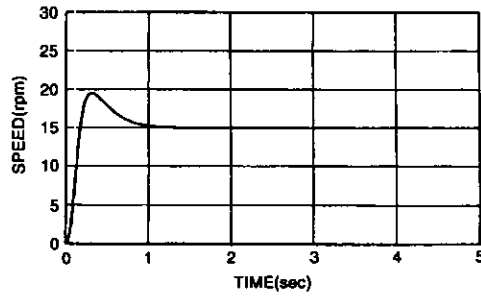


Fig. 7 Simulation speed response in the case of speed command 15[rpm]

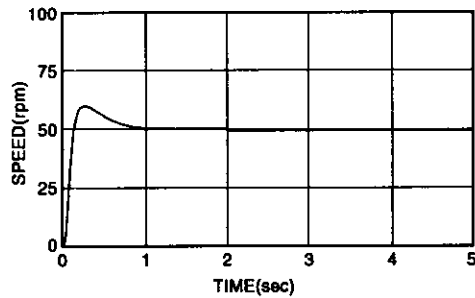


Fig. 8 Simulation speed response in the case of speed command 50[rpm]

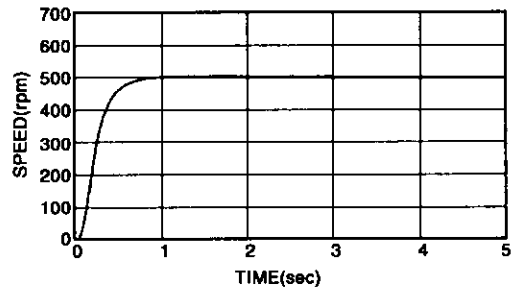


Fig. 9 Simulation speed response in the case of speed command 500[rpm]

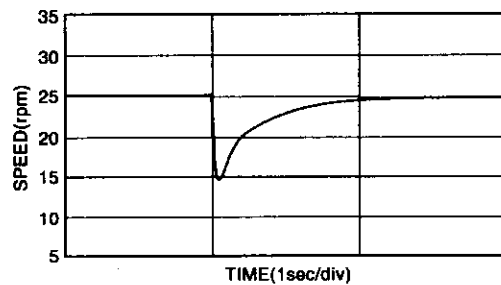


Fig. 10 Simulation speed response at stepwise load variation(25[rpm], 0 → 7[N-m])

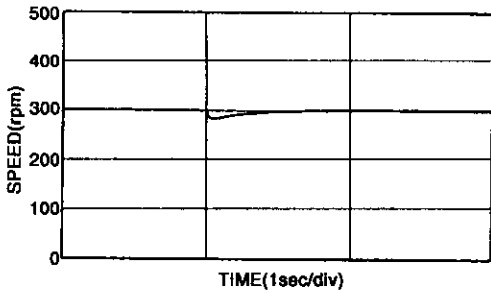


Fig. 11 Simulation speed response at stepwise load variation(300[rpm], 0 → 10[N-m])

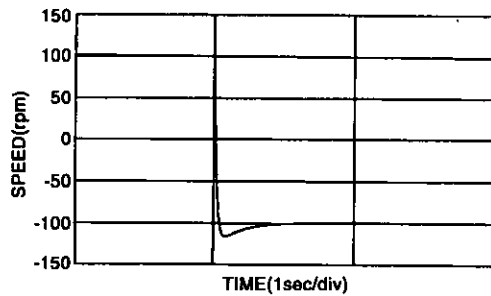


Fig. 12 Simulation speed response for the bidirectional operation (100 → -100[rpm])

레이션 결과를 도시하고 있으며, 저속에서도 양호한 제어특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 25, 300[rpm]으로 구동중 부하를 인가하였을 경우의 속도응답을, Fig. 12는 100[rpm]으로 구동중 -100[rpm]으로 역전속도 지령을 인가한 경우의 속도응답을 나타내고 있다. 부하변동 및 속도지령변화에도 잘 추종함을 보여 주고 있다.

5. 실험 및 검토

본 센서리스 속도제어 시스템을 구현하기 위한 하드웨어의 구성은 세부적으로 마이크로 프로세서 시스템, 상전류 및 직류링크전압 검출회로, 게이트 구동회로, 전력회로로 구성되었고 속도응답 특성의 검정을 위해 별개의 속도검출회로가 필요하다. 제어루틴은 소프트웨어 타이머 인터럽트에 의해 실행되는데 기입한 임의의 데이터에 기초하여 일정하게 주기적으로 수행된다. 먼저, PCL-

Table 1 Motor specification

정격출력	3[HP]	R_r	1.7 [Ω]
정격전압	220[V]	L_n	180[mH]
정격속도	1720[rpm]	L_r	180[mH]
극수	4	L_m	176[mH]
R_s	2.2 [Ω]	J	0.1[$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

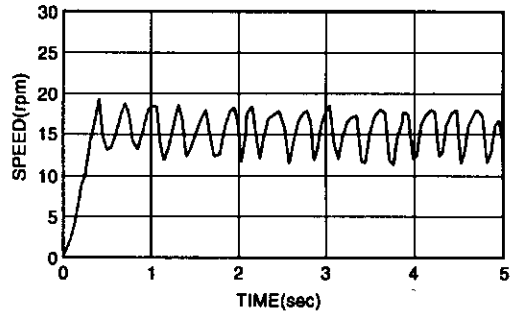


Fig. 13 Experimental speed response at no-load condition (15[rpm])

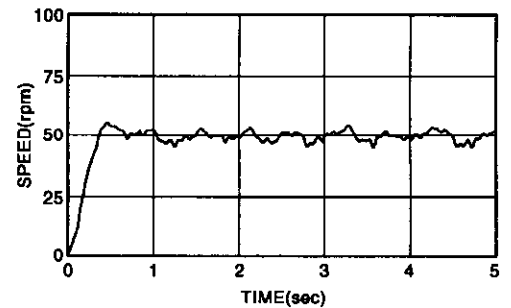


Fig. 14 Experimental speed response at no-load condition (50[rpm])

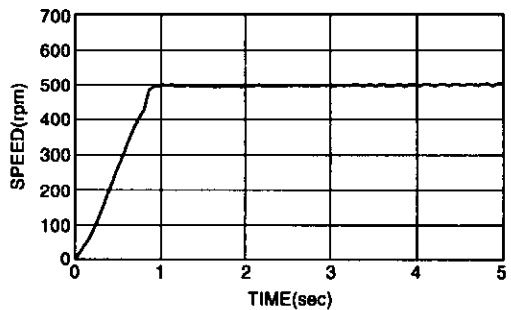


Fig. 15 Experimental speed response at no-load condition (500[rpm])

818 Card 내부의 A/D 변환기를 이용하였으며 샘플링주기는 150 μsec 로 하였다.

3상 인버터의 전력소자는 IGBT를 사용하였으며, 속도검출회로에는 저속에서의 정밀도를 높이

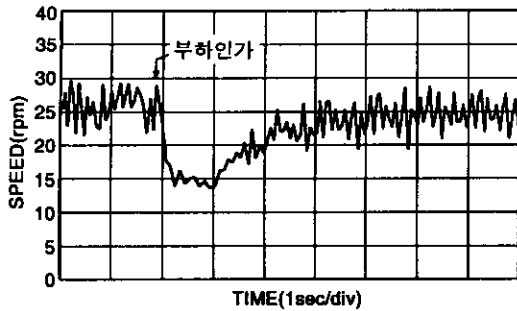


Fig. 16 Experimental speed response at stepwise load variation(25[rpm], 0→7[N-m])

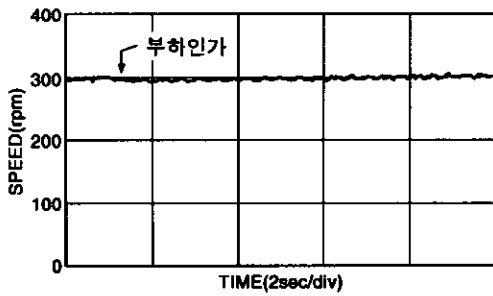


Fig. 17 Experimental speed response at stepwise load variation(300[rpm], 0→10[N-m])

기 위해 출력펄스간의 시간간격을 측정함으로써 속도를 계산하는 T 방식을 적용하였고 1000 [pulses/rev]의 엔코더를 사용하였다. 엔코더 펄스간의 시간간격은 펄스 한 주기동안 발생하는 1MHz 발진기의 클럭을 계수하여 환산하였다.

본 실험에서 사용된 3상 유도전동기의 사양은 Table 1과 같다.

Fig. 13~Fig. 15는 무부하에서 속도지령치를 15, 50, 500[rpm]으로 한 경우의 속도응답 실험결과이다. 저속에서도 속도제어특성이 비교적 양호함을 보여주고 있다.

Fig. 16과 Fig. 17은 25, 300[rpm]으로 구동중 부하토크를 인가하였을 경우의 응답결과인데 중·저속에서의 부하특성이 우수함을 보여주고 있다.

Fig. 18은 100[rpm]으로 구동중 -100[rpm]으로 역전속도지령을 인가한 경우의 속도응답 실험결과를 나타내고 있다. 속도지령변화에도 잘 추종

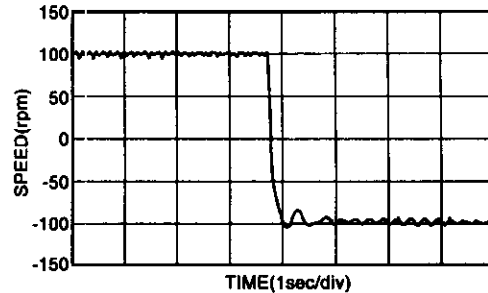


Fig. 18 Experimental speed response for the bidirectional operation (100→-100[rpm])

함을 보여주고 있다.

5. 결 론

유도전동기에 의한 가변속 구동시스템에서 자속속 기준제어인 벡터제어를 적용하는 경향이 증가하고 있으며, 최근에는 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 속도제어 방식이 폭 넓게 연구되고 있다. 그 중 모델기준 적용시스템은 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하며 비교적 폭 넓게 사용되는 제어구조의 하나이다. 그러나, 종래의 MRAS는 적분기의 사용으로 인해 포화 및 표류 문제를 유발하고, 저속시 역기전력의 크기가 미소하므로 정확한 값을 얻기가 어렵다.

본 논문에서는 유도전동기의 센서리스 속도제어 방식으로서 새로운 MRAS에 의한 제어방식을 제안하였다. 이 방식은 MRAS가 가지는 단점을 극복하기 위하여 기준모델의 회전자 자속추정을 역기전력과 자속설정치를 각각 지연회로에 인가하여 그 합을 자속추정치로 하는 상태관측기에 의하여 수행하는 방식이다. 본 알고리즘을 적용함으로써 정격속도 1% 정도의 저속시에도 비교적 우수한 속도제어를 행할 수 있었으며 이를 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통해 입증하였다.

참고문헌

- [1] R. Joetten and G. Maeder, "Control Methods for Good Dynamic Performance Induction Motor

Drives Based on Current and Voltages as measured Quantities", IEEE, IA-19, No. 3, pp.356~363, 1983.

[2] B. K. Bose and M. G. Simoes, "Speed Sensorless Hybrid Vector Controlled Induction Motor Drive", IEEE IAS Ann. Mtg., pp. 137~143, 1995.

[3] S. Tamai, H. Sugimoto and M. Yano, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor with Model Reference Adaptive System", IEEE/IAS, pp.185~195, 1997.

[4] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers", IEEE, IA-28, No. 5., pp.1,054~1,061, 1992.

[5] S. Doki, S. Sangwongwanich and S. Okuma, "Implementation of Speed Sensorless Field Oriented Vector Control Using Adaptive Sliding Observer", IEEE/IECON, pp.453~458, 1992.

[6] I. Miyashita and Y. Ohmari, "A New Speed Observer for an Induction Motor Using the Speed Estimation Technique", pp.349~353, 1993.

[7] G. Henneberger, B. J. Brunsbach, Th. Klepsch, "Field Oriented Control of Synchronous and Asynchronous Drives without Mechanical Sensors using a Kalman Filter", EPE Firenze, vol.3, pp.3,664~3,671, 1991.

[8] Y. R. Kim, S. K. Sul, M. H. Park, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor using Extended Kalman Filter", IEEE Trans. Indus. Appli., vol.30, no.5, pp.1,225~1,233, 1994.

[9] M. Ishida and K. Iwata, "A New Slip Frequency Detector of an Induction Motor Utilizing Rotor Slot Harmonics", IEEE, IA-20, No. 3, pp.575~581, 1984.

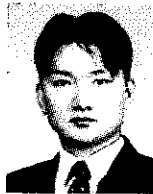
[10] F. Profumo, G. Griva, M. Pastorslli and J. C.

Moreira, "Universal Field Oriented Controller Based on Air Gap Flux Sensing via Third Harmonic Stator Voltage", IEEE, IA-30, No. 2, pp.448~455, 1994.

[11] F. Z. Peng and T. Fukao, "Robust Speed Identification for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors", IEEE, IA-30, No. 5, pp.1,234~1,240, 1994.

[12] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines ", from Clarendon press. Oxford, 1990.

저 자 소 개



김덕기(金德基)

1975년 3월생, 1997년 한국해양대학교 선박운항시스템공학과(기관시스템전공) 졸업. 1999년~현재 동 대학원 기관공학과 석사과정



김종수(金宗洙)

1970년 6월생, 1994년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1998년 동 대학원 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 기관공학과 박사과정



김성환(金成煥)

1954년 11월생, 1979년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1990년 부경대학교 대학원 졸업(석사), 1998년 부산대학교 대학원 졸업(박사), 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 부교수