

새로운 유도전동기 센서리스 벡터제어 알고리즘

박근상, 김우현*, 최병태, 최연호, 권우현
경북대학교, 영남이공대학*

A New Sensorless Vector Control Algorithm For Induction Motors

Park Keun-Sang, Kim Woo-Hyen*, Choi Byeong-Tae,
Choi Youn-Ho, Kwon Woo-Hyen

Kyungpook National University, Yeungnam College of Science & Technology*

ABSTRACT

This paper describes a new approach to estimate induction motor speed from terminal voltages and currents for speed-sensorless vector control. This algorithm is based on Model Reference Adaptive System(MRAS). The proposed technique is simple and robust to the variation of motor parameters. Specially, this algorithm is not affected by the variation of stator resistance and it does not require any pure integration at all. The validity of this new approach is proved by simulations.

1. 서 론

오늘날, 간접 벡터 제어 이론은 유도 전동기의 구동을 위해 많이 이용되고 있다. 이 방법은 속도뿐만 아니라 토크 제어를 위해 엔코더와 같은 속도 센서가 필요한데 이러한 속도 센서의 사용은 시스템의 신뢰성을 떨어뜨리며 가격 상승의 요인이 된다. 그래서 최근에 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 다양한 속도-센서리스 제어 이론이 제안되고 있다.

Tamai는 모델 기준 적응 기법(MRAS)을 이용하여 회전자 속도를 추정하는 방법을 제안하였다^[1]. 이 모델 기준 적응 기법을 이용한 회전자 속도 추정 방법은 전류나 전압에 DC offset이 포함되었을 경우 순수 적분기의 영향으로 속도 추정이 이루어지지 않는다는 문제점과 회전자 자속이 고정자 저항의 변화에 민감하다는 단점이 있다. Peng은 Back-EMF를 이용한 새로운 모델 기준 적응 기법을 제안하였다^[2]. 이 방법은 기존의 MRAS의 문제점이었던 순수적분기를 고이득을 가지는 저역통과 필터로 대체함으로써 DC offset으로 인해 발생되던 문제점을 해결하였다. 그러나 기존의 문제점이었던 고정자 저

항의 변화에 역시 민감하다. Schauder는 기준 모델에서의 순수 적분기를 지연 요소로 놓음으로써 순수 적분기 문제를 해결하였다^[3]. 이는 속도 추정 대역폭이 넓은 장점이 있다. Peng은 무효전력을 이용하여 속도를 추정하였다^[4]. 이는 정지좌표계가 아닌 동기 좌표계를 이용하여 순수 적분기 문제를 해결하였을 뿐 아니라 고정자 저항의 변화에 따른 문제점 또한 해결하였다. Karmachi는 고정자 전압과 전류를 사용한 회전자 속도 추정 방법을 제안하였다^[5]. 이는 개루프를 이용한 속도 추정 방법이므로 매우 간단하며 과도 상태 응답이 빠르다는 장점이 있지만, 유도 전동기의 파라미터 변화에 매우 민감하다는 단점이 있다. Henneberger는 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter)를 이용한 회전자 속도 추정 방법을 제안하였다^[6]. 이 방법은 잡음에 대해 견실하지만 계산량이 다소 많으며 복잡하다는 문제점이 있다. Kubota는 고정자 저항, 회전자 시상수와 회전자 속도를 추정하기 위한 관측기를 제안하였다^[7]. 이는 루엔버그 상태 관측기(Luenberger Observer)라는 제어 이론을 이용해 고정자 전류와 회전자 자속을 함께 추정하고, 관측기로 추정된 전류와 자속을 이용하여 고정자 저항, 회전자 시상수 및 회전자 속도를 추정하는 방법이다. 이 방법은 알고리즘 자체가 다소 복잡하며 이득 설정의 어려움이 있다.

본 논문에서는 모델 기준 적응 기법을 이용한 새로운 회전자 속도 추정 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 순수 적분기와 고정자 저항을 이용하지 않고 정확한 회전자 속도를 추정할 수 있으므로 다른 전동기 파라미터 변화에 대해 견실하다. 그리고 모의 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 확인한다.

2. 본 론

유도 전동기의 전압 방정식을 동기 좌표계로 나타내면 식 (1)~(4)와 같다.

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e \quad (1)$$

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e \quad (2)$$

$$0 = r_r i_{qr}^e + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^e \quad (3)$$

$$0 = r_r i_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^e \quad (4)$$

식 (1)~(4)에서 고정자, 회전자 자속은 식 (5)~(8)과 같이 표현된다.

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad (5)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (6)$$

$$\lambda_{qr}^e = L_r i_{qr}^e + L_m i_{qs}^e \quad (7)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_r i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e \quad (8)$$

2.1 전압 방정식을 이용한 모델

식 (1), (2)의 고정자 전압방정식을 고정자 전류와 회전자 자속 성분에 대한 식으로 표현하면 식 (9), (10)과 같다.

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \frac{\omega_e L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^e + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^e + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{qs}^e \quad (9)$$

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \frac{\omega_e L_m}{L_r} \lambda_{qr}^e - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^e + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^e + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{ds}^e \quad (10)$$

벡터 제어되는 정상 상태라고 가정하면 식 (9), (10)의 미분항은 소거되므로 식(11), (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \frac{\omega_e L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^e \quad (11)$$

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \frac{\omega_e L_m}{L_r} \lambda_{qr}^e - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^e \quad (12)$$

식 (11), (12)에서 회전자 자속을 고정자 전압과 고정자 전류의 항으로 표현하면 식 (13), (14)와 같다.

$$\lambda_{dr}^e = \frac{L_r}{\omega_e L_m} (v_{qs}^e - r_s i_{qs}^e) - \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} i_{ds}^e \quad (13)$$

$$\lambda_{qr}^e = \frac{L_r}{\omega_e L_m} (-v_{ds}^e + r_s i_{ds}^e) - \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} i_{qs}^e \quad (14)$$

식 (13), (14)를 보면 회전자 자속을 구하는 데 고정자 저항이 필요하다. 하지만 고정자 저항은 주위의 온도나 환경 등의 영향을 받아 쉽게 변한다. 이는 회전자 속도를 추정함에 있어서 상당히 큰 영향을 미친다. 그래서, 본 논문에서는 회전자 속도가 고정자 저항의 영향을 받지 않도록 하기 위해 식 (13)에 i_{ds}^e 를, 식 (14)에 i_{qs}^e 를 각각 곱하여 더한다. 그러면 식 (15)와 같이 고정자 저항이 포함되지 않은 새로운 식을 얻을 수 있다.

$$\lambda_{dr}^e i_{ds}^e + \lambda_{qr}^e i_{qs}^e = \frac{L_r}{\omega_e L_m} (v_{qs}^e i_{ds}^e - v_{ds}^e i_{qs}^e) - \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} (i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2}) \quad (15)$$

2.2 전류 방정식을 이용한 모델

식 (3), (4)에서 벡터 제어가 이루어진다고 가정하면, $\frac{d\lambda_{qr}^e}{dt} = 0$, $\frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} = 0$ 이 된다. 이 때 식 (3), (4)를 식(7), (8)에 각각 대입하여 회전자 자속에 대해서 정리하면 식(16), (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_{qr}^e = L_m i_{qs}^e - \omega_{sl} T_r \lambda_{dr}^e \quad (16)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_m i_{ds}^e + \omega_{sl} T_r \lambda_{qr}^e \quad (17)$$

여기서, $\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$, $T_r = \frac{L_r}{r_r}$ 이다.

식 (16), (17)을 각각 q, d축의 회전자 자속 성분에 대해 정리하면

$$\lambda_{qr}^e = \frac{L_m i_{qs}^e - L_m \omega_{sl} T_r i_{ds}^e}{1 + (\omega_{sl} T_r)^2} \quad (18)$$

$$\lambda_{dr}^e = \frac{L_m i_{ds}^e + L_m \omega_{sl} T_r i_{qs}^e}{1 + (\omega_{sl} T_r)^2} \quad (19)$$

와 같다.

식 (15)의 좌변과 같이 만들기 위해 식 (18)에 i_{qs}^e 을, 식 (19)에 i_{ds}^e 를 곱하여 더하게 되면 식 (20)과 같은 식이 나오게 된다.

$$\lambda_{dr}^e i_{ds}^e + \lambda_{qr}^e i_{qs}^e = \frac{L_m (i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2})}{1 + (\omega_{sl} T_r)^2} \quad (20)$$

식 (15)를 기준 모델, 식 (20)을 가변 모델이라고 하면 가변 기준 모델과 가변 모델을 구분하기 위해 가변 모델인 식 (20)을 식 (21)과 같이 표현한다.

$$\widehat{\lambda}_{dr}^e \widehat{i}_{ds}^e + \widehat{\lambda}_{qr}^e \widehat{i}_{qs}^e = \frac{L_m (i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2})}{1 + (\omega_{sl} T_r)^2} \quad (21)$$

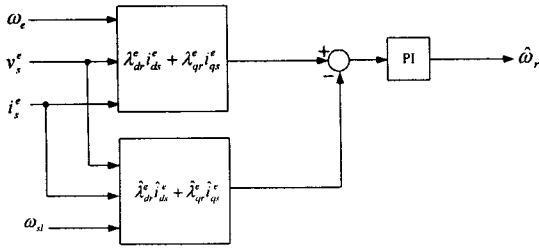


그림 1 회전자 속도 추정 알고리즘.
Fig. 1 Rotor speed estimation Algorithm.

제안한 방법을 이용한 회전자 속도 추정 알고리즘은 그림 1과 같다. 여기서, 회전자 속도가 정확하다면 식 (15)와 식 (21)은 항상 같은 값을 가진다. 하지만 속도가 정확하지 않다면 식 (15)와 식 (21)은 서로 다른 값을 가지게 된다. 이 때의 속도 오차와 PI 제어기를 이용하여 회전자 속도를 추정하게 된다.

2.3 모의실험

본 논문에서 제시한 센서리스 벡터 제어 알고리즘의 타당성을 증명하기 위해 MATLAB을 사용해 유도전동기 및 벡터 제어를 모델링한 후, 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용한 센서리스 벡터 제어를 구현하였다. 그림 2는 제안한 회전자 속도 추정 알고리즘을 이용한 유도전동기 센서리스 벡터 제어 시스템의 블록도를 나타내고 있다. 모의 실험에서 사용된 유도전동기의 회로 변수들을 표 1에 나타내었다.

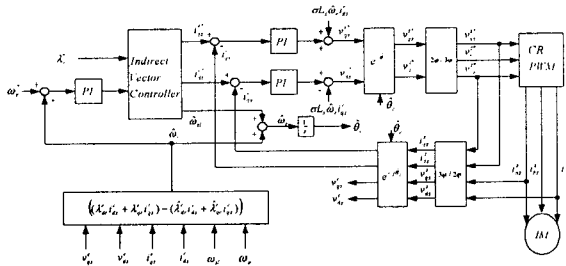


그림 2 회전자 속도 추정 알고리즘을 포함한 전체 블록도
Fig. 2 Block Diagram which contains rotor speed estimator

표 1 모의 실험에 사용된 유도전동기 회로 변수
Table 1 Specifications of the induction motor

정격출력	1[HP]	고정자저항	2.5[Ω]
정격전압	220[V]	회전자저항	1.95[Ω]
정격전류	3[A]	고정자 누설 인덕턴스	0.0075[H]
정격주파수	60[Hz]	회전자 누설 인덕턴스	0.0075[H]
극수 (Pole)	4	상호 인덕턴스	0.153[H]

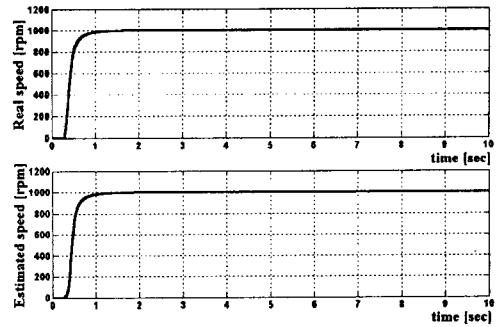
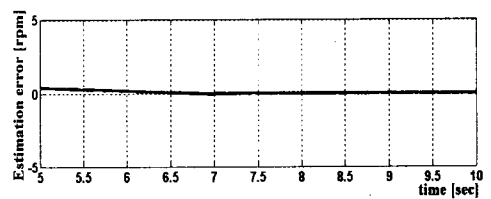
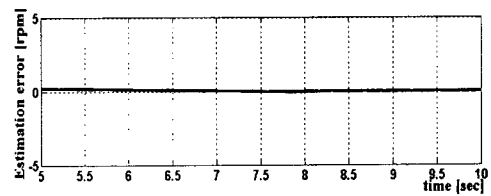


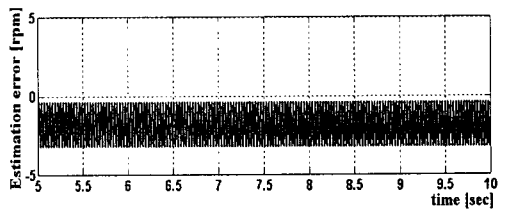
그림 3 제안한 알고리즘을 이용한 속도 응답
Fig. 3 Speed Response Using Proposed Algorithm



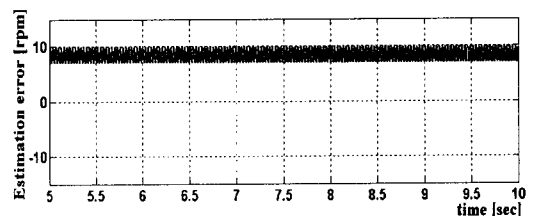
(a) 고정자 저항 변화($r_s \Rightarrow 2r_s$)시 속도 오차



(b) 회전자시상수 변화($T_r \Rightarrow 2T_r$)시 속도 오차



(c) Offset 전압(10%)인가시 속도 오차



(d) Offset 전류(10%)인가시 속도 오차

그림 4 제안한 알고리즘에서의 속도 추정 오차
Fig. 4 Speed Estimation Error in The Proposed Algorithm

그림 3에는 제안한 방법을 이용하여 센서리스 벡터 제어를 수행했을 때의 파형을 나타내었다. 1000[rpm]의 속도 명령을 인가했을 때 실제 회전자 속도와 추정된 회전자 속도 응답을 나타내고 있다. 빠른 과도 상태 응답을 보이며 과도 상태나 정

상 상태에서의 속도 응답시 거의 오차 없이 정확하게 센서리스 벡터 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 4에는 그림 3의 실험 상태에서 고정자 저항, 회전자 시상수, 측정 전압, 전류의 오차시 발생하는 속도추정오차를 나타내었다. 그림 4(a)는 고정자 저항을 실제 저항 값보다 두 배($r_s \Rightarrow 2r_s$) 증가시켰을 때 실제 속도와 추정 속도의 오차를 나타내고 있다. 속도를 추정하는 식 (15)와 식 (21)에서 고정자 저항에 대한 영향을 배제시켰기 때문에 고정자 저항의 변화에 따른 속도 응답의 오차가 거의 없음을 알 수 있다.

간접 벡터 제어기에서 중요한 역할을 하는 회전자 시상수의 변화가 제안한 속도 추정 알고리즘에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 4(b)에는 회전자 시상수를 두 배($T_r \Rightarrow 2T_r$) 변화시켰을 때 나타나는 속도 추정 오차를 나타내었다. 그림 4(b)에서 회전자 시상수가 두배 변화했음에도 불구하고 속도 추정 오차는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

DC offset 전압이나 전류가 회전자 속도 추정에 어떠한 영향을 미치는지 보기 위해서 그림 4(c), 4(d)에는 측정 전압과 전류에 10%의 offset을 더했을 때 발생하는 속도추정을 나타내었다. 그림 4(c)에서 속도 추정 오차는 약 3[rpm]정도 발생하고, 그림 4(d)에서 속도추정오차는 약 10[rpm]정도 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 제안한 방법을 이용한 회전자 속도 추정에서 전압, 전류의 offset은 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 센서리스 벡터 제어기의 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 회전자 속도 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법에서는 유도 전동기의 전압 방정식과 전류 방정식에서 구한 자속과 전류의 오차를 이용하여 회전자 속도를 추정하였고 제안된 알고리즘은 빠른 회전자 속도 추정 특성을 보이며, 기존의 모델 기준 적응 기법(MRAS)이 가지고 있던 고정자 저항의 변화에 의한 영향과 순수 적분기 영향에 의한 문제를 해결하였다. 그리고, 제안한 알고리즘이 주위 온도나 환경 등의 영향으로 쉽게 변하는 회전자 시상수에 대해서도 강인함을 모의 실험을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] S. Tamai et al. , "Speed Sensorless vector Control of Induction Motor with Model Reference Adaptive

System," *IEEE IAS Annu Meet*, pp. 189-195, 1987.

- [2] F. Z. Peng and T. Fukao, "Robust Speed Identification for Speed Sensorless Vector Control of Induction Motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 30, No. 5, pp. 1234-1240, 1994, Sept./Oct.
- [3] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for vector control of Induction Motors without rotational transducers," *IEEE IAS Ann Meet*. pp. 493-499, 1989.
- [4] S. S. Perng, Y. S. Lai and C. H. Liu, "Sensorless Vector Control for Induction Motor Drives With Parameter Identification," *IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1008-1013, Vol. 2 , 1998.
- [5] T. Kanmachi, I. Takahashi, "Sensorless Speed Control of Induction Motor with No Influence of Secondary Resistance Variation," *IEEE IAS Meeting*, Vol. 1, pp. 91-96, 1997.
- [6] G. Henneberger, B. T. Brunsbach and T. Klepsch, "Field Oriented Control of Synchronous and Asynchronous Drives without Mechanical Sensors Using a Kalman Filter," *EPE*, pp. 664-671, 1991.
- [7] H. Kubota, K. Matsuse, "Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation," *IEEE Trans. on Industry Application*, pp. 1219-1224, 1994.
- [8] R. D. Lorenz and D. B. Lawson, "Performance of feedforward current regulators for field oriented induction machine controllers," *IEEE Trans. Industry Application*, Vol IA-23, pp. 142-150, 1987, Jan./Feb.
- [9] Ho E. Y. Y and Sen P. C, "Decoupling Control of Induction Motor Drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol 35, pp. 253-262, 1988, May.