

# 적응 속도추정기를 이용한 유도전동기의 최적 고정자 자속 기준제어

정 인화\*, 신 명호\*, 변 철웅\*\*, 현 동석\*  
\*한양대학교 전기공학과, \*\*생산기술연구원

## Optimized Stator Flux Oriented Control of IM using Adaptive Speed Estimator

In-Wha Jeong\*, Myoung-Ho Shin\*, Cheol-Woong Byun\*\*, Dong-Seok Hyun\*  
\*Hanyang Univ., \*\*Korea Academy of Industrial Technology

Abstract.- For high performance ac drives, the speed sensorless vector control and the stator flux orientation concept have received increasing attention. This paper presents a new method of estimating the speed of AC induction machine(IM). To improve the speed estimation characteristics, accurate stator resistance variation is considered. The effectiveness of the proposed method is verified by computer simulation.

### I. INTRODUCTION

벡터 제어는 지금까지 유도기의 고성능 동작을 얻기 위한 방법으로 많이 응용되어 왔는데, 기본적으로 AC 유도기(IM)의 벡터 제어는 속도 또는 위치 센서를 필요로 한다. 그러나 이러한 센서들의 사용은 가격, 신뢰도, 기기의 크기, 그리고 노이즈 등의 관점에서 볼 때 여러 문제점을 가져올 수 있고 이러한 이유로 유도기의 센서리스 제어가 필요하게 된다.

먼저, 유도기의 벡터 제어 방법을 구분해보면 다음 두 가지 방법으로 나눌 수 있다:

1. Field orientation control type
2. Slip frequency control type

지금까지 많은 논문에서, 위의 벡터 제어방법을 적용한 속도 센서리스 구동 알고리즘을 제시하고 있다[10]. 여기서 공통적인 기본 아이디어는 유도기에 공급되는 전압, 전류를 사용하여 속도를 추정한다는 사실이다.

간략히 살펴보면, Slip frequency control type에 적용된 센서리스 알고리즘은 인버터 주파수와 추정된 슬립 주파수에 의해 간접적으로 추정되는데 대체로 간단하게 구성된다. 한편, Field orientation control type에 적용된 알고리즘은 넓은 속도 영역에서 센서리스 구동이 이루어지도록 속도 뿐 아니라, 기준 자속의 추정이 동시에 이루어져야 한다. 이때 구동 시스템의 정확성과 안정성을 향상시키기 위해, 실시간 파라미터 적응 제어를 활용하기도 한다.

이렇게 살펴본 두 가지 제어방법을 전기적, 기계적 특성면에서 향상시키기 위해서는 유도기의 파라미터, 자속 등과 같은 추가적인 정보들이 필요한데 이 때문에 단순하면서도 정확한 속도 추정 알고리즘 설계가 어려워지는 것이다.

이와 같이 제어방법이나 부하조건 등과 같은 외적 상황 변화에도 안정적으로 동작하는 범용 속도 추정기의 역할은 그 중요성이 강조되고 있다. 이에 본 논문에서는 여러 제어방법에 쉽게 적용할 수 있는 간단한 속도 추정 알고리즘을 제안하

고 유도기의 파라미터 변화에 강인한 특성과 우수한 제어 능력을 보여주는 고정자 자속 벡터를 기준으로 한 stator FOC에 적용하여 그 활용 가능성을 살펴보고자 한다. 제안한 속도 추정 방법은 유도기의 순시 모델을 기초로 저속영역에서 동작 특성에 큰 영향을 미치는 고정자 저항 변화를 고려하여 보다 향상된 결과를 얻으려 한다.

## II. MODEL OF INDUCTION MACHINE

회전자 속도는 유도기 모델을 사용하여, 고정자에 가해진 전압과 전류를 통해 추정될 수 있다.

본 논문에서 제안한 속도 추정 알고리즘은 유도기의 공간 벡터 모델로부터 유도 되었으며, 동기 속도로 회전하는 기준 축에서 본 고정자 전압 방정식은 다음과 같다:

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} + j\omega_s \vec{\psi}_s \quad (1)$$

또한, 농형 유도기의 회전자 전압 방정식을 나타내 보면,

$$0 = R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \vec{\psi}_r \quad (2)$$

여기서, 고정자와 회전자 자속 벡터들은 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{\psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (3)$$

$$\vec{\psi}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \quad (4)$$

먼저, 회전자 자속을 고정자 자속과 전류로 표현해 보면:

$$\vec{\psi}_r = k_1 \vec{\psi}_s - k_2 \vec{i}_s \quad (5)$$

위 방정식들에서,

- $k_1 = (1 + \sigma_r)$
- $k_2 = L_m [(1 + \sigma_s)(1 + \sigma_r) - 1]$
- $\sigma_s = \frac{L_{sl}}{L_m}$

$$\bullet \sigma_r = \frac{L_{rl}}{L_m}$$

## III. OPEN LOOP STATOR FLUX ESTIMATION

제안한 구동 시스템은 전 속도 영역에서 고정자 자속 기준제어 FOC 방법을 사용하고 있다.

속도 추정에 필요한 고정자 자속  $\psi_s$ 와 기준 축의 동기 각속도  $\omega_s$ 를 구하기 위해 먼저, 고정자 자속을 측정한 고정자 전압과 전류 값으로 추정해 보면:

$$\hat{\psi}_s = \iint [\vec{v}_s - R_s \vec{i}_s] dt \quad (6)$$

위 결과를 d-q 축으로 분리하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (7)$$

$$\psi_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (8)$$

and

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_{ds}^2 + \psi_{qs}^2} \quad (9)$$

$$\rho_s = \arctan\left(\frac{\psi_{qs}}{\psi_{ds}}\right) \quad (10)$$

$$\omega_s = \frac{d}{dt} \rho_s = \frac{(v_{qs} - R_s i_{qs}) \psi_{ds} - (v_{ds} - R_s i_{ds}) \psi_{qs}}{|\psi_s|^2} \quad (11)$$

식 (6)-(11)에서 보듯 고정자 자속 기준제어는 파라미터 변화에 영향을 적게 받는다는 장점을 갖고 있다. 즉, 보정하기 쉬운 고정자 저항 변화에만 영향을 받을 뿐, 고정자, 회전자 누설 인덕턴스나 자화 인덕턴스 등과 같은 파라미터의 변화에는 자속 추정이 영향받지 않는다. 이때, 대개의 경우 고정자 저항 변화는 주로 온도 변화에 의해 결정된다.

그러나 고정자 자속 기준제어에서는 d-q 축의 커플링 효과에 주의를 기울여야 하며 특히, 저속 영역에서 자속 추정을 위해 사용된 순수 적분식이

불안정할 수 있다는 사실을 고려해야 한다. 이는 전압 측정에서 발생하는 노이즈나 드리프트 효과 때문이며 순수 적분식 대신 low pass filter (LPF)를 사용해서 해결될 수 있다.

#### IV. NEW SPEED ESTIMATOR

식 (1)~(5)를 사용하여 고정자 전압 방정식은 고정자 전류와 자속만으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{v}_s &= \left[ R_s + \frac{R_r}{k_1}(1 + \sigma_s) \right] \bar{i}_s + \frac{k_2}{k_1} \frac{d\bar{i}_s}{dt} \\ &+ j(\omega_s - \omega_r) \frac{k_2}{k_1} \bar{i}_s - \frac{R_r}{k_1 L_m} \bar{\psi}_s + j\omega_r \bar{\psi}_s \\ &= \bar{v}_{1s} + \bar{v}_{2s} + \bar{v}_{3s} + \bar{v}_{4s} \end{aligned} \quad (12)$$

위 식을 실수부와 허수부로 구분하고 다시 실수부 기준 축을 고정자 자속 벡터에 일치하도록 설정하면, 최종적으로 다음식을 얻게 된다.

$$v_{ds} = v_{1ds} + v_{2ds} + v_{3ds} + v_{4ds} \quad (13)$$

$$v_{qs} = v_{1qs} + v_{2qs} + v_{3qs} + v_{4qs} \quad (14)$$

여기서,

$$v_{1ds} = \left[ R_s + \frac{R_r}{k_1}(1 + \sigma_s) \right] i_{ds} \quad (15)$$

$$v_{2ds} = \frac{k_2}{k_1} \frac{d}{dt} i_{ds} \quad (16)$$

$$v_{3ds} = -(\omega_s - \omega_r) \frac{k_2}{k_1} i_{qs} \quad (17)$$

$$v_{4ds} = -\frac{R_r}{k_1} \frac{\psi_s}{L_m} \quad (18)$$

$$v_{1qs} = \left[ R_s + \frac{R_r}{k_1}(1 + \sigma_s) \right] i_{qs} \quad (19)$$

$$v_{2qs} = \frac{k_2}{k_1} \frac{d}{dt} i_{qs} \quad (20)$$

$$v_{3qs} = (\omega_s - \omega_r) \frac{k_2}{k_1} i_{ds} \quad (21)$$

$$v_{4qs} = \omega_r \psi_s \quad (22)$$

결과식 (13)와 (14)는 동기 좌표축에서 표현된 고정자 전압 방정식이다.

전압형 유도기인 경우, 속도 추정을 위해 d축 전압식 (13) 또는 q축 전압식 (14)을, 측정된 전류 값과 함께 사용할 수 있다.

이를 결정하기 위해 각각의 전압 성분들을 살펴보면,

$$I. v_{ds} = v_{1ds} + v_{2ds} + v_{3ds} + v_{4ds} \quad (13)$$

- $v_{1ds}, v_{4ds}$ : 속도에 독립적인 저항 전압강하 성분
- $v_{2ds}$ : 속도에 독립적인 성분으로 자속이 일정한 경우 zero
- $v_{3ds}$ : 유일하게 속도에 관계되는 성분으로  $v_{ds}$ 에 비해 매우 작은 값

$$II. v_{qs} = v_{1qs} + v_{2qs} + v_{3qs} + v_{4qs} \quad (14)$$

- $v_{1qs}$ : 저항 전압강하 성분
- $v_{2qs}$ : 누설 인덕턴스에 관계되는 성분
- $v_{3qs}$ : 유도기의 슬립에 관계되는 성분으로 매우 작은 값
- $v_{4qs}$ : 속도에 관계되는 주요 emf 성분

I. 과 II.를 통해 d축 전압식( $v_{3ds}$ )은 속도변화에 매우 작은 감지도를 나타내어, 속도 추정에 부적합함을 알 수 있고 최종적으로 q축 전압식 ( $v_{3qs}$  and  $v_{4qs}$ )을 속도 추정에 사용해야 된다는 결론에 이르게 된다.

이때 제안하는 알고리즘에 의해, d축 전압식에서는 고정자 저항  $R_s$ 의 변화를 추정하여 고정자 자속과 속도 추정에 정확성과 안정성을 높이고자 한다.

Figure 1.에는 제안한 알고리즘의 개요도가 보여지고 있다.

$$\hat{\omega}_r = \frac{v_{qs} - (v_{1qs} + v_{2qs})}{|\psi_s|} \quad (23)$$

$$\hat{R}_r = \frac{v_{ds} - (v_{1ds} + v_{2ds})}{-|\psi_s| / k_1 L_m} \quad (24)$$

$$\hat{R}_s = R_{sm} \hat{R}_r \quad (25)$$

여기서,  $R_{sm}$  은 고정자와 회전자 공칭 저항값의 비율이다.

두 가지 저항값들이 모두, 동작 온도에 의해 변화하므로 두 저항값들이 서로 비례하도록 설정되어 있다[2].

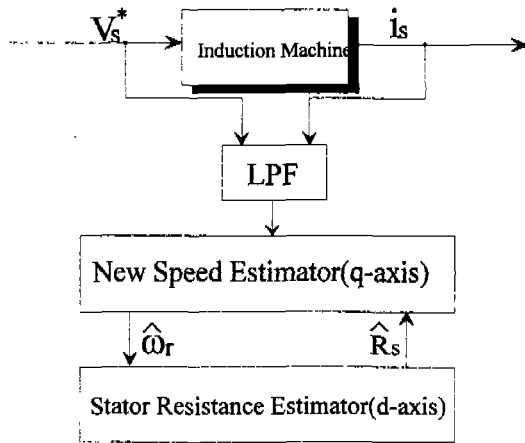


Figure 1. Block diagram of the proposed estimator

## V. SIMULATION

제안된 추정 방법의 타당성을 입증하기 위하여 “Advanced Continuous Simulation Language” (ACSL) 환경 아래에서 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

Figure 2.에는 시뮬레이션 결과가 보여지고 있다.

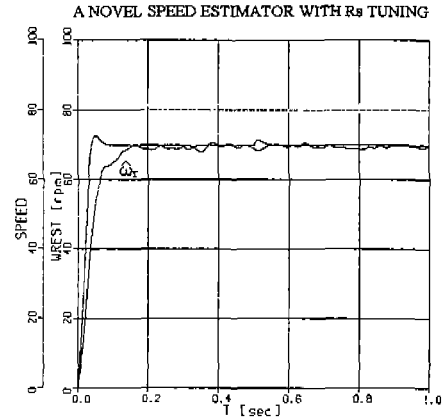
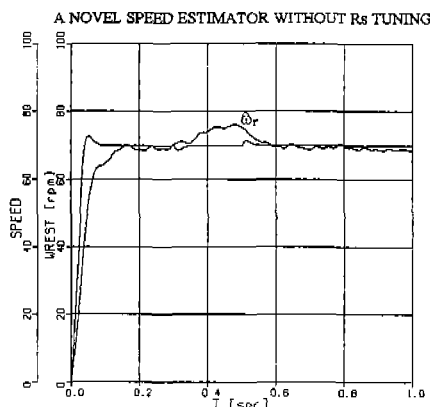


Figure 2. Speed estimations at 70[rpm]

시뮬레이션 결과, 식(23)에 의해 안정적으로 추정될 수 있는 최소 속도는 대략 80[rpm] 정도였으며 그 이하의 속도에서는 부하 토크의 영향에 의해 추정 오차가 발생하였다. 이렇게 정확한 속도 추정이 어렵게 되는 저속 영역에서 식(24), (25)에 의해 제시된 고정자, 회전자 저항 추정 방법을 적용하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 정격 속도의 4[%] 정도 되는 70[rpm]에서도 0.3초~0.5초 동안의 부하 토크(2[Nm])에 영향 받지 않고 정확하게 속도를 추정할 수 있었다.

## VI. CONCLUSION

본 논문에서는 고정자의 전압과 전류 값을 이용하여 속도와 고정자, 회전자 저항을 동시에 추정해내는 간단한 알고리즘을 제안하였다. 이렇게 유도기 저항의 적응 제어를 통해, 앞에서 제시된 간단한 속도 추정기의 안정성과 정확성을 개선시킬 수 있었으며 동작 영역도 확대시킬 수 있었다.

이는 여러 종류의 속도 제어계에 쉽게 활용되어 보다 향상된 최적의 제어 특성을 얻을 수 있도록 도울 것이다.

< Induction Motor Specification >

정격	220[V], 3 Phase, 4 pole, 2.2[kW], 60[Hz]
고정자 저항( $R_s$ )	1.26 [ $\Omega$ ]
회전자 저항( $R_r$ )	1.28 [ $\Omega$ ]
고정자 누설 인덕턴스( $L_{si}$ )	3.0[mH]
회전자 누설 인덕턴스( $L_{rl}$ )	3.0[mH]
차회 인덕턴스( $L_m$ )	105[mH]

REFERENCES

- [1] X. Xu, R. D. Doncker, and D. W. Novotny, " A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive", IEEE PESC , pp. 870-876, 1988.
- [2] H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano, " DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans. IA, Vol. 29, NO. 2, pp. 344-348, March/April 1993.
- [3] H. Tajima and Y. Hori, " Speed Sensorless Field Orientation Control of the Induction Machine", IEEE Trans. IA, Vol. 29, NO. 1, pp. 175-180, Jan/Feb 1993.
- [4] T. G. Habetler, F. Profumo, and G. Griva, " Stator Resistance Tuning In A Stator Flux Field Oriented Drive Using An Instantaneous Hybrid Flux Estimator", IEEE EPE, pp. 292-299, 1993.
- [5] L. Loron, " Stator Parameters Influence On The Field Oriented Control Tuning", IEEE EPE, pp. 79-84, 1993.
- [6] E. Akin, H. B. Ertan, and M. Y. Uctug, " A Method For Stator Resistance Measurement Suitable For Vector Control", IEEE IECON, pp. 2122-2126, 1994.
- [7] B. K. Bose and M. G. Simoes, " Speed Sensorless Hybrid Vector Controlled Induction Motor Drive", IEEE IAS, pp. 137-143, 1995.
- [8] J. Holtz, " Methods for Speed Sensorless Control of AC Drives", IEEE PCC-Yokohama, pp. 415-420, 1993.
- [9] S. Sathiakumar, K.S. Rajashekara, and K.V. Baburaj, " A Novel Speed Estimator For High Performance Speed Control Of An Induction Machine", PEMC, pp. 2/210-2/214, 1996.
- [10] K. Rajashekara, A. Kawamura, and K. Matsuse, " Sensorless Control of AC Motor Drives", IEEE PRESS, pp. 1-19, 1996.
- [11] B. K. Bose, " Power Electronics and Variable Frequency Drives", IEEE PRESS, pp. 454-479, 1997.