

# 개선된 적응 자속 관측기 기반 유도 전동기 속도 센서리스 제어

문주영\*, 홍찬욱\*, 유안노\*, 윤영두\*\*  
LS산전\*, 명지대학교\*\*

## Improved Adaptive Full-order Observer for Speed Sensorless Control of Induction Motor

Jooung. Moon\*, Chanook. Hong\*, Anno. Yoo\*, Young-Doo. Yoon\*\*  
LSIS\*, Myoungji University\*\*

### ABSTRACT

유도 전동기의 센서리스 방법 중 적응 자속 관측기 기반의 센서리스 제어는 유도 전동기의 고정자 전압과 전류로부터 정지 좌표계 상의 고정자 전류와 회전자 자속을 추정하고, 추정된 회전자 자속과 고정자 전류 추정 오차로부터 회전자 속도를 추정하는 방식으로, 산업계에서 널리 사용되는 유도 전동기 속도 센서리스 제어 방식 중 하나이다. 기존의 적응 자속 관측기는 중/고속에서의 전류 추정 성능이 저하되어 중/고속에서의 제어 성능이 저하되는 단점이 있어 왔다. 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하기 위한 개선된 적응 자속 관측기의 설계 방법을 제안하고 3.7kW 유도 전동기를 이용한 실험을 통하여 제안된 방식의 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

벡터제어(Field Oriented Control : FOC) 이론은 고성능 속도/토크 제어를 요구하는 유도 전동기 구동 분야에서 널리 활용되고 있다. 벡터 제어는 좌표변환을 통하여 자속 분 전류와 토크 분 전류로 분리하여 각각 독립적인 제어가 가능하게 하며 좌표변환을 위해서는 회전자 자속의 위치 정보가 필요하다. 회전자 자속 정보를 추정(estimation) 또는 계산(calculation) 하기 위해서는 회전자 위치가 필요하고, 회전자 위치를 측정하기 위하여 레졸버(resolver) 또는 엔코더(encoder)와 같은 기계적인 회전자 위치 센서가 주로 사용되고 있다. 하지만, 회전자 위치 센서는 잡음(noise)에 취약하고, 유지 보수(maintenance)가 필요하며, 전동기 구동 시스템의 가격 상승 및 부피 증가의 요인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 다양한 유도 전동기 속도 센서리스(speed sensorless) 벡터제어 방법이 제안되고 있으며, 산업계에서 이용되는 유도 전동기 센서리스 벡터 제어는 자속 관측기(flux estimator)에 기반을 두는 경우가 대다수이다. 일반적으로 유도 전동기 속도 센서리스 제어에 사용되는 자속 관측기는 유도 전동기의 전압 모델을 바탕으로 하는 방법과 적응 속도 관측기(speed-adaptive flux observer)를 이용하는 방법이 대표적이다.

적응 속도 관측기가 적용된 유도 전동기 속도 센서리스 제어의 경우 전압 모델을 바탕으로 하는 방법과 비교하여 저속 운전 시의 성능이 상대적으로 우수한 반면, 정확한 궤환 이득 선정이 어렵고 고속 운전 시 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 Kubota 교수에 의해 제안된 적응 속도 관측기 기반의 유도 전동기 속도 센서리스 제어 시 발생하는

중/고속 영역에서의 전류 추정 오차를 분석하고 이를 보완하기 위한 방법을 제안하였다. 제안된 방식은 3.7kW 유도 전동기를 이용한 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

### 2. 기존 적응 자속 관측기 기반 센서리스 제어

기존의 적응 자속 관측기 기반 유도 전동기 속도 센서리스 제어 기법은 Kubota 교수가 제안한 방법으로 적응 제어(adaptive control) 이론을 적용하여 전동기의 속도 및 고정자 저항을 추정하는 방법이다<sup>[2]</sup>. 이 방법을 적용하기 위해서 유도기 모델의 상태(state)를 고정자 전류와 회전자 자속으로 구성하고, 입력과 출력을 고정자 전압, 고정자 전류로 구성하여 다음과 같이 유도 전동기의 상태 방정식(state equation)을 만들 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s^s \\ \lambda_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^s \\ \lambda_r^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} V_s^s = Ax + BV_s^s \quad (1)$$

$$i_s^s = CX \quad (2)$$

$$A_{11} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right)I = a_{r11}I \quad (3)$$

$$A_{12} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \left(\frac{1}{T_r}I - \omega_r J\right) = a_{r12}I + a_{i12}J \quad (4)$$

$$A_{21} = \frac{L_m}{T_r}I = a_{r21}I \quad (5)$$

$$A_{22} = -\frac{1}{T_r}I + \omega_r J = a_{r22}I + a_{i22}J \quad (6)$$

$$B_1 = \frac{1}{\sigma L_s}I = b_1I \quad (7)$$

$$C = [I \ 0] \quad (8)$$

상태 방정식으로부터 추정기는 아래와 같은 방식으로 구현하고 추정된 고정자 전류와 회전자 자속으로부터 속도도 추정한다.

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = \hat{A}\hat{x} + BV_s^s + G(i_s^s - \hat{i}_s^s) \quad (9)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$g_1 = (k-1)(a_{r11} + a_{r22}) \quad (11)$$

$$g_2 = (k-1)a_{i22} \quad (12)$$

$$g_3 = (k^2-1)(ca_{r11} + a_{r21}) - c(k-1)(a_{r11} + a_{r22}) \quad (13)$$

$$g_4 = -c(k-1)a_{i22} \quad (14)$$

유도 전동기 자체가 안정적인 시스템이므로 관측기를 포함한 전체 시스템의 극점이 전동기의 극점과 비례하도록 관측기의 이득행렬 G를 설정한다. 자속 관측기로부터 추정된 고정자 전류와 회전자 자속으로부터 회전자 속도를 식(15)를 이용해 추정한다.

$$\hat{\omega}_r = K_p(e_{ids}\hat{\lambda}_{qr}^s - e_{iqs}\hat{\lambda}_{dr}^s) + K_I \int (e_{ids}\hat{\lambda}_{qr}^s - e_{iqs}\hat{\lambda}_{dr}^s) dt \quad (15)$$

### 3. 개선된 적응 자속 관측기 기반 센서리스 제어

앞서 살펴본 것처럼, 기존의 Kubota 교수가 제안한 자속 관측기에서 k=1로 설정하게 되면, 추정기 이득이 영이 되어 유도 전동기 자체의 극점을 사용하게 된다. 유도 전동기의

극점은 그림 1과 같이 나타나며, 유도 전동기 속도에 따라서 변하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 원점 근처의 극점을 우세극점(dominant pole)이라 하며 시스템의 제어성을 결정하게 된다. 저속 운전의 경우, 두 개의 극점이 원점 근처의 좌반면(left half plane)에 위치하는 반면에 중/고속 운전의 경우, 유도 전동기의 운전 속도가 증가함에 따라서 우세극점이 허수축(imaginary axis)으로 증가하여 추정기의 감쇄(damping) 효과가 저하되는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 자속 관측기의 이득을 조정하여 극점을 재배치하면 제어 성능의 개선을 기대할 수 있다. 관측기의 특성 방정식(characteristic equation)을 식(16)과 같이 설정하고 임의의 극점 위치를 속도가 증가함에 따라 왼쪽으로 이동하도록 배치하여, 자속 관측기의 추정 성능 향상을 기대할 수 있다.

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (16)$$

관측기의 극점이 허수축으로 증가하는 것이 아니라 실수축의 좌반면을 따라 증가 하도록 재배치 하였기 때문에 중/고속 영역에서 추정기의 감쇄 효과를 증가시켜 기존의 방식에 비해서 전류 추정 성능을 개선할 수 있다.



그림 1. 속도에 따른 자속 관측기의 극점

#### 4. 실험 결과

실험에는 3.7kW 유도 전동기와 5.5kW-220V 3상 인버터가 사용되었으며 유도 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 3.7kW 유도 전동기 파라미터

내용	값[단위]	내용	값[단위]
정격 전력	3.7[kW]	$R_s$	0.345[Ω]
정격 속도	1745[rpm]	$T_r$	228[ms]
정격 입력 주파수	60[Hz]	$L_s$	61.77[mH]
극 수	4	$\sigma L_s$	6.72[mH]
정격 전류	14.5[A]	관성	0.05[kgm <sup>2</sup> ]

그림 2와 그림 3은 저속과 고속영역에서 d축 고정 좌표계 고정자전류 추정 성능을 나타낸 그림이다. 저속영역에서는 그림 2에서 확인 할 수 있는 것처럼 기존의 제어 방법과 제안된 방법 모두 전류 추정이 잘 되는 것으로 확인 할 수 있다. 하지만 그림 3을 보면 기존의 제어 방법은 고속영역에서 전류 추정이 잘 이루어지지 않는 반면에 제안된 방법은 고속영역에서도 우수한 전류 추정 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

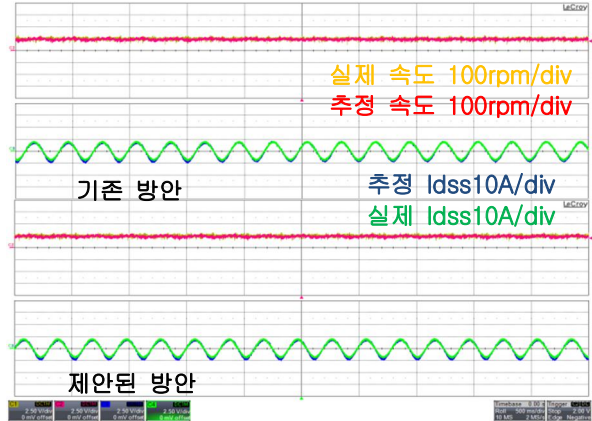


그림 2. 저속영역(100rpm)에서의 전류 추정성능 비교

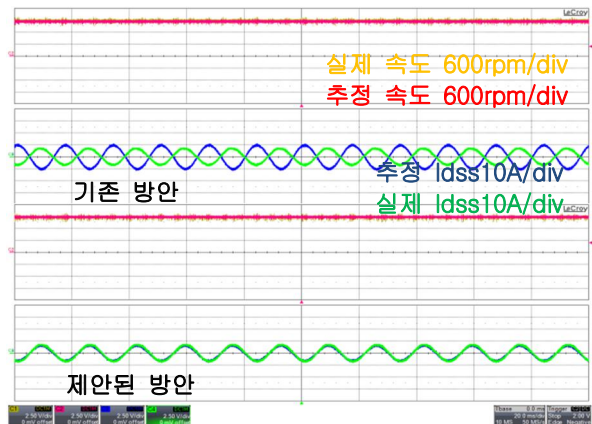


그림 3. 고속영역(1800rpm)에서의 전류 추정성능 비교

#### 5. 결론

본 논문에서는 기존의 적응 자속 관측기 기반 속도 센서리스 제어에서 나타나는 중/고속영역에서의 전류 추정 성능 부족 문제를 고찰하고 이를 해결할 수 있는 방안을 제안하였다. 제안된 방법에서는 자속 관측기의 극점 위치를 운전속도에 맞추어 재배치하여 추정 성능을 향상시켰다. 개선된 유도 전동기 센서리스 방식은 벡터제어와 근접한 성능으로 저속부터 고속까지 모든 운전 영역에서 우수한 성능을 가질 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

- [1] 박용환, 최종우, 김홍근, 김진규, 최영태, 노의철, 전태원, "자속관측기를 이용한 유도전동기 센서리스 제어의 특성 해석," 전력전자학회논문지, 2003.
- [2] H.Kubota, K.Matsuse, and T.Nakano, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol.29, No.2, Mar/Apr. 1993