

## 속도센서없는 유도전동기 벡터제어 시스템의 파라메타 추정

김상욱<sup>o</sup>, 권영길, \*김영조, 김영석  
이화대학교 전기공학관, \*유한전문대학

### Parameter Estimation for Vector Control of Induction Motors without Speed Sensors

Sang-Uk Kim<sup>o</sup>, Young-Gil Kwon, Young-Jo Kim, Young-Seok Kim  
Inha Univ. \*Yuhan Junior College

**Abstract** - This paper consists of the speed sensorless vector control of induction motors with the estimation of rotor resistance. In the application of variable-speed induction motor drives, if an inaccurate rotor resistance is used because the rotor resistance can change due to skin effects and temperature variables, it is difficult to achieve a collect field orientation. In this paper, to overcome these difficulties adaptive algorithm is designed for rotor resistance identification. The proposed adaptive algorithm for rotor resistance estimation in the synchronous reference frame is applied by sliding mode current controller satisfying persistent excitation(PE) condition. Adaptive flux observer is here used for the purpose of estimating rotor flux and speed in the speed sensorless scheme. Computer simulations are carried out to verify the validity of the proposed algorithm.

#### 1. 서론

유도전동기의 속도제어 분야에 있어서 벡터제어의 실현은 마이크로 프로세서와 고성능 전력소자의 급속한 발달로 인하여 가능하게 되었다. 유도전동기의 벡터제어시 속도 제어제와 좌표변환에 회전속도 정보가 필요하기 때문에 속도센서가 사용되어진다. 그러나 속도센서는 시스템의 견실성, 보수성의 면에서, 또는 사용환경에 따라 그 사용이 바람직 하지 못한 경우가 있다. 따라서 속도센서없는 벡터제어에 대한 연구가 요구되어지고 있다[1-3].

속도센서없는 벡터제어는 속도센서를 사용하지 않고 측정된 전동기의 전압, 전류에 의해 속도추정을 행하고 이 속도추정치를 이용하여 벡터제어와 속도 피드백 제어를 한다. 그러나 속도센서리스 제어를 구현하기 위해서는 전동기 모델에 관한 정보의 정확성이 요구되어지며, 특히 속도추정에 영향을 미치는 2차저항의 변동이 문제시 된다. 왜냐하면 회전자저항의 상승은 자속이 포화되고 이러한 자속의 포화는 유도전동기를 불안정 영역에서 운전할 수도 있기 때문이다. 또한 온도상승 등으로 실제와 다른 회전자저항을 사용하였을 때 구해진 여자분전류와 토오크분전류는 정수의 오차에 해당하는 만큼의 출력오차를 포함하게 된다. 그러므로 속도센서없는 유도전동기 구동시스템에서 제어성능을 향상하기 위해서는 변동하는 회로정수를 실시간으로 추정하여 보상하는 시스템은 절실히 요구되어지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실측된 회전자속도를 이용하여 회전자저항을 추정하는 벡터제어시스템을 제안하므로써 회전자저항 변동으로 인한 출력의 오차를 최소화하고 있

다. 그러나 이 방법들은 회전자저항 변동에 강한 장점을 가지고 있으나 속도를 측정하여야 하므로 센서없는 벡터제어에 의 여러 가지 잇점을 살리지 못한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 회전속도를 측정하지 않고 회전자저항 변동에 강한 면에서도 원하는 고정도의 제어성능을 얻기 위하여 회전속도와 회전자저항을 동시 추정하는 제어법이 절실히 요구되고 있다.

그러나 회전속도와 회전자저항을 동시 추정하는 제어법의 경우 정상상태에서 상태변수로부터 회전속도의 오차와 회전자저항의 오차를 동시에 분리할 수 없기 때문에, 즉 전동기의 전압방정식에서 회전속도와 회전자저항의 항이 같은 방향으로 존재하기 때문에, 그리고 회전자저항을 추정하기 위한 제어입력신호가 충분히 존재하지 않으므로써 Persistently Exciting 조건에 위배되기 때문에 회전속도와 회전자저항을 동시 추정하는 제어법이 불가능하다고 알려져 왔다.

따라서 논문에서는 회전자속도 및 회전자저항을 동시 추정하는 속도센서없는 벡터제어기를 제안한다. 적용 동일차원 2차자속관측기를 이용하여 회전자속 및 회전속도를 추정하고, 축소차수 회전자속 관측기를 새롭게 설계하며, Lyapunov의 안정도 이론에 합당한 회전자저항 추정기를 개발한다. 그리고 측정된 전동기의 고정자전류를 피드백하여 회전자속의 지정치를 추종하도록 하는 슬라이딩 모드 제어기를 설계하고 이를 통하여 제어입력신호가 충분히 존재하도록 하는, 즉 두 개의 파라메타를 동시 추정하는 것이 가능하게 하는 Persistently Exciting 조건을 만족하게 하므로써 제안된 추정기로서 회전자저항을 추정한다. 따라서 실시간으로 과도상태 및 정상상태에서 회전자속도 및 회전자저항을 동시 추정하는 속도센서없는 벡터제어기를 제안한다.

#### 2. 적용 동일차원 2차자속 관측기

유도전동기의 속도센서리스 벡터제어 시스템을 구현하기 위하여 기존의 적용 동일차원 2차자속 관측기를 이용한다. 적용 동일차원 2차자속 관측기는 1차전류와 2차자속을 추정하며, 속도추정을 위한 적용동정칙은 1차전류의 실제값과 추정치의 차 및 회전자속의 추정치로부터 도출되고, 적용동정칙의 안정성은 Lyapunov의 안정도 이론에 의해 확인한다. 고정자좌표계상에서의 유도전동기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + Bv, \tag{1}$$

$$Y = CX \tag{2}$$

여기서

$$X = [i, \lambda, ]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \left\{ -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right\} I$$

$$A_{12} = \frac{M}{\sigma L_s L_r} \left\{ \frac{1}{\tau_r} I - \omega_r J \right\}$$

$$A_{21} = \frac{M}{\tau_r} I$$

$$A_{22} = -\frac{1}{\tau_r} I + \omega_r J$$

$$B_1 = \frac{1}{\sigma L_s} I \quad v_s = [v_{ds} \ v_{qs}]^T$$

$$C = [I \ 0] \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \tau_r = \frac{L_r}{R_r}$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

동일차원 2차자속 관측기는 고정자전류의 추정오차를 수정 피드백 항으로 부가하여 구성된다.

$$\dot{\hat{X}} = \hat{A} \hat{X} + B v_s + G(\hat{i}_s - i_s) \quad (3)$$

관측기의 극이 유도전동기 고유의 극에  $k$ 배 비례하도록 설정한다면, 가변극배치 동일차원 2차자속 관측기를 구성할 수 있다. 동일차원 2차자속 관측기에 속도에 관한 동정 기구를 첨가하고 동정 기구의 안정성을 확보하기 위해서 Lyapunov의 안정도 판별법을 이용하며 동정기의 구성은 다음과 같다[4].

$$\dot{\hat{\omega}}_r = K_{\omega r}(e_{\omega} \hat{\omega}_{or} - e_{\omega} \hat{\omega}_{dr}) + K_{\omega i} \int (e_{\omega} \hat{\omega}_{or} - e_{\omega} \hat{\omega}_{dr}) dt \quad (4)$$

여기서,  $e_{\omega} = \hat{i}_{\omega} - i_{\omega}$ ,  $e_{\omega} = \hat{i}_{\omega} - i_{\omega}$ 이다.

### 3. 회전자자속 관측기

회전자자속관측기를 구성하기 위하여 이들의 실제치와 추정치를 오차신호로하여 회전자좌표계상에서 다음과 같은 관측기를 구성한다.

$$\dot{\lambda}_{dre} = -\frac{R_{re}}{L_r} \lambda_{dre} + \frac{R_{re} M}{L_r} i_M \quad (5)$$

$$\dot{\hat{\lambda}}_{dre} = -\frac{R_{re}}{L_r} \hat{\lambda}_{dre} + \frac{R_{re} M}{L_r} i_M + g(\hat{\lambda}_{dre} - \lambda_{dre}) \quad (6)$$

여기서  $g$ 는 관측기 이득이다.

### 4. 회전자저항 추정을 위한 적응칙의 유도

구성되어진 회전자자속관측기를 통하여 이들의 실제치와 추정치를 오차신호로하여 회전자저항을 추정하는 적응 동정칙을 도출하며 적응동정칙의 안정성을 Lyapunov의 안정도 이론으로 확인한다. 상태 변수의 추정 오차를  $e = \lambda_{dre} - \hat{\lambda}_{dre}$ 라 하고, 추정 오차 ( $\Delta R_{re}$ )를 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{e} = \left(-\frac{R_{re}}{L_r} + g\right)e + \frac{\Delta R_{re}}{L_r} \hat{\lambda}_{dre} - \frac{\Delta R_{re} M}{L_r} i_M \quad (7)$$

$V \geq 0$ ,  $\dot{V} < 0$ ,  $f \geq 0$  을 만족하는 Lyapunov 함수  $V$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$V = e^T e + j \quad (8)$$

$V$ 의 시간 미분을 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T e + e^T \dot{e} + j \\ &= e^T \left[ -\frac{R_{re}}{L_r} + g \right] e - 2e^T \left[ -\frac{\Delta R_{re}}{L_r} \hat{\lambda}_{dre} + \frac{\Delta R_{re} M}{L_r} i_M \right] + j \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 우변 제 1항의 부정성은 관측기 극을 안정하도록 좌방평면에 설계되기 때문에 만족되며, 우변의 나머지항의 부정성에 관하여 조사한다. 회전자저항에 대한 적응칙을 식 (10)로 정의한다.

$$\dot{\hat{R}}_{re} = -K e^T \left[ -\hat{\lambda}_{dre} + M i_M \right] \quad (10)$$

그리고 함수  $j$  를 다음과 같이 정의한다.

$$j = \frac{(\Delta R_{re})^2}{L_r K} \quad (11)$$

$$\dot{j} = \frac{2\Delta R_{re} \cdot \Delta \dot{R}_{re}}{L_r K} = \frac{2\Delta R_{re} \cdot \dot{\hat{R}}_{re}}{L_r K} \quad (12)$$

식(10)의 나머지 항을 정리하면 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} &-2e^T \left[ -\frac{\Delta R_{re}}{L_r} \hat{\lambda}_{dre} + \frac{\Delta R_{re} M}{L_r} i_M \right] + j \\ &= -2e^T \left[ -\frac{\Delta R_{re}}{L_r} \hat{\lambda}_{dre} + \frac{\Delta R_{re} M}{L_r} i_M \right] \\ &+ \frac{2\Delta R_{re} \cdot [-K e^T (-\hat{\lambda}_{dre} + M i_M)]}{L_r K} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 Lyapunov의 안정도 이론은 확립되었으며 도출된 적응동정칙을 이용하여 회전자저항을 동정할 수 있다.

### 5. 회전자저항 및 회전속도의 동시추정

회전속도와 회전자저항을 동시 추정하는 것이 불가능한 이유는 동기좌표계상에서 유도전동기의 등가회로로부터 볼 수 있듯이 정상상태에서 상태변수로부터 회전속도의 오차와 회전자저항의 오차를 동시에 분리할 수 없기 때문이다. 즉 전동기의 전압방정식에서 회전속도와 회전자저항의 정보가 같은 방향으로 존재하기 때문이며, 회전자저항을 추정하기 위한 제어 입력신호가 충분히 존재하지 않으므로서 Persistently Exciting 조건에 위배되기 때문이다[5].

그러나 동기좌표계상에서 회전자자속속(D축)의 등가회로로부터 볼 수 있듯이 전동기 속도에 관한 정보가 회전자자속속(D축)의 등가회로에 포함되어 있지 않기 때문에 회전자저항을 추정할 때 회전속도의 변동에 관계없이 추정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 제안되어진 회전자저항 추정기는 모든 항이 d축 성분으로 구성되어 있으므로 속도 변동에 관계없이 회전자저항을 추정하는 것이 가능하다.

그리고 Persistently Exciting 조건을 충족시키고 회전자저항의 추정성능을 개선시키기 위하여 슬라이딩 모드 제어방식을 이용한 전류제어기를 제안한다. 가변구조 제어는 한 개의 스위칭 면을 중심으로 고주파 스위칭을 행하여 상태궤적이 스

위칭 면을 벗어나지 않도록 하는 것이므로 슬라이딩모드 제어 방식을 이용한 전류제어기의 출력전압에서 스위칭 노이즈 성분은 Persistently Exciting 조건을 충족시키고 회전자저항의 추정성능을 개선시킬 수 있다. 따라서 회전자저항 추정을 위해 적용된 슬라이딩모드 전류제어기는 기존의 잇점을 살릴 수 있고 동시에 회전자저항의 동시 추정이 가능하게 한다.

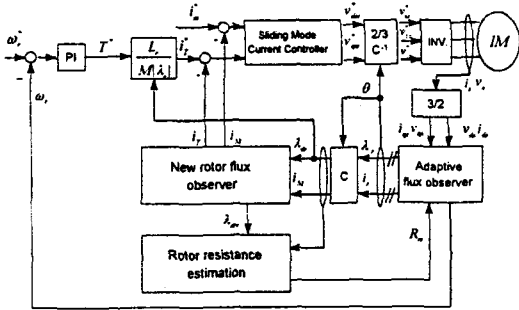


그림 1 전체 시스템의 구성도

## 6. 모의실험 및 결과

제안하는 알고리즘을 이용한 속도센서리스 벡터제어기의 전체 블록도는 그림 1과 같다. 제어기의 성능을 평가하기 위하여 600rpm을 인가하였을 때의 속도응답특성을 살펴보았다. 그림 2, 그림 3, 그림 4는 회전자저항 및 회전자저항 추정치 그리고 회전자저항 추정치를 보여주고 있다. 0.5초후에 50%의 부하를 인가하였으며, 0.7초후에 저항변동을 150%로 하였다. 회전자저항의 추정오차에 따라 초기과도상태 및 회전자저항의 변동시 추정속도오차가 증가하고 있음을 볼 수 있으나 정상상태는 양호하게 지령속도에 응답하고 있음을 볼 수 있다. 또한 회전자저항 동시 추정기의 성능은 초기 0.15초동안 약간의 오버슈트를 볼 수 있으나 곧 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있으며, 추정되어진 회전자저항 변동의 보상을 통하여 추정 속도 및 실제속도가 회전자저항 변동으로 인한 영향이 거의 없음을 볼 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 적응제어 알고리즘을 이용하여 회전자저항 동정을 갖는 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어를 행하였다. 속도센서리스 벡터제어기를 구현하기 위하여 적응동일차원 자속관측기를 이용하였으며 회전자저항을 추정하기 위해서 회전자저항추정기를 구성하고 적응동정칙의 안정성을 Lyapunov의 안정도 이론으로 확인하였다. 그리고 Persistently Exciting 조건을 충족시키고 회전자저항의 추정성능을 개선시키기 위하여 슬라이딩 모드 제어방식을 이용한 전류제어기를 제안하였으며, 이로부터 추정된 회전자저항변동에 대한 보상을 실시함으로써 회전자저항의 추정성능을 향상시킬 수 있었다. 추후과제로는 실험을 통하여 전속도 영역 및 부하변동시에도 원하는 속도 응답특성을 얻고, 동시에 정확한 회전자저항을 추정하는 속도센서리스 벡터제어기를 구현하는 것이다.

## 참고문헌

[1] Colin Scudder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.28, No.5, '92, pp 1054-1061

[2] Youngreal Kim, Seungki Sul, Minho Park, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using an Extended Kalman Filter", IEEE IAS, 1992, pp 594-599

[3] S. Tamai, H. Sugimoto, M. Yano, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motors with Model Reference Adaptive System", IEEE IAS, 1987, pp 189-195

[4] Hisao Kubota, Kouki Matsue, "Adaptive Flux Observer of Induction Motor and its Stability" T.IEE Japan, vol.111-D, No.3, '91, pp188-194

[5] S. Sangwongwanich, and S. Doki, T. Yonemoto, T. Furuhashi, S. Okuma, "On Design of Adaptive Sliding Observers for Induction Motor Control," in IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, pp. 8-17, 1990.

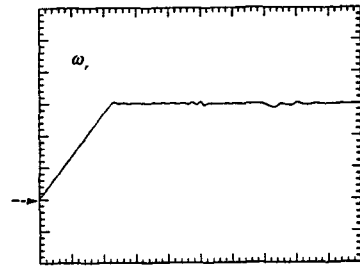


그림 2 회전자저항(150%) 및 부하(50%)변동을 주었을 경우의 실제속도 [200rpm, 100msec/div]

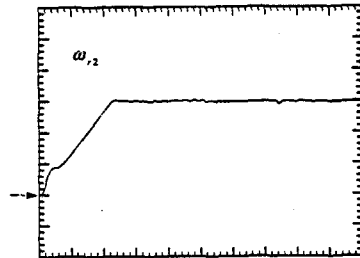


그림 3 회전자저항(150%) 및 부하(50%)변동을 주었을 경우의 추정속도 [200rpm, 100msec/div]

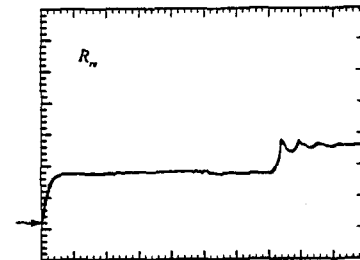


그림 4 회전자저항(150%) 및 부하(50%)변동을 주었을 경우의 회전자저항 추정치 [0.3Ω, 100msec/div]