

## 회전자자저항동정을 갖는 유도전동기의 속도센서리스

### 벡터제어

\*김 상우\*, 최 세완\*\*, 김 영조\*\*\*, 김 영석\*

\*인하대학교 전기공학과\*\*삼성전기\*\*\*유한전문대 제어계측과

### Speed Sensorless Vector Control of Induction Motors with the Identification of Rotor Resistance

Sang-uk Kim<sup>1</sup>, Se-wan Choi<sup>2</sup>, Young-Jo Kim<sup>3</sup>, Young-seok Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>INHA University, <sup>2</sup>"Samsung Electro-Mechanics, <sup>3</sup><sup>4</sup>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 correct field orientation. In this paper, to overcome these difficulties adaptive algorithm is designed for rotor resistance identification at the beginning of the transient state. And an adaptive flux observer is 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.

#### I. 서론

유도전동기의 속도제어 분야에 있어서 벡터제어의 실현은 마이크로 프로세서와 고성능 전력소자의 급속한 발달로 인하여 가능하게 되었다. 유도전동기의 벡터제어 방식 중에서 슬립주파수형 벡터제어가 실용화되고 있다. 그러나, 이 제어법은 2차자속을 설정하기 위하여 동가회로를 사용하기 때문에 회로정수에 감도가 매우 높은 단점을 가지고 있다. 유도전동기의 회로정수는 온도의 변화, 자기포화 등에 크게 영향을 받으며, 이로 인한 회로정수의 오차는 원하는 제어성능을 얻을 수 없다. 따라서 회로정수가 변동하더라도 보다 정확한 2차자속을 추정하기 위한 2차자속판측기(Observer)에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 또한 속도센서를 부착할 수 없는 특수한 용도나 시스템의 간소화·비용화의 요구에 따라 속도 센서리스 벡터제어에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[2,3]. 그러나 속도 센서리스 제어를 구현하기 위해서는 전동기 모델에 관한 정보의 정확성이 요구되어지며, 구현시 회전자자저항의 변동에 관한 정보는 매우 중요하다. 실제로 회전자자저항의 변동은 자속의 정보를 부정확하게 하고 이로 인하여 저령전류의 위상이 현재 실제 전류의 위상과 다르게 되어 제어가 곤란하게 된다. 이를 극복하기 위해 회전자자저항을 동정하는 방법과 강인제어(Robust Control) 방식이 제안되고 있다[4,5]. 그러나 이 방법들은 자속이나 속도센서가 부착되어야 한다는 점이 있어 속도센서리스 벡터제어를 성취할 수 없다.

위와 같은 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 회전자자저항 동정을 갖는 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어를 제안한다. 속도센서리스 벡터제어를 성취하기 위하여 회전자자속과 회전자속도는 적용 동일차원 2차자속판측기를 이용하여 추정한다. 유도전동기의 벡터제어 시스템에서 자속이 일정한 상태에서는 회전자속도와 회전자자저항을 동시에 동정하는 것은 불가능하다[6]. 그러나 실제로 회전자자속은 회전속도의 변화를 가지는 과도상태와 부하의 변동에 따라서 변화한다. 그러므로 회전자자속이 변화하는 과도상태에서 최소자원 판측기를 이용하여 회전자자저항을 동정하는 적용동정칙을 도출하고, 적용동정칙의 안정성을 Lyapunov의 안정도 이론으로 확인한다. 그리고 모의실험을 통하여 제안하는 알고리즘의 타당성을 보인다.

#### II. 회전자속도의 동정

유도전동기의 속도센서리스 벡터제어 시스템을 구현하기 위하여 기존의 적용 동일차원 2차자속 판측기를 이용한다. 적용 동일차원 2차자속 판측기는 1차전류와 2차자속을 추정하며, 속도추정을 위한 적용동정칙은 1차전류의 실제값과 추정치의 차로부터 도출하고, 적용동정칙의 안정성을 Lyapunov의 안정도 이론에 의해 확인한다. 고정자좌표계상에서의 유도전동기의 상태방정식은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BV, \quad (1)$$

$$Y = CX \quad (2)$$

여기서

$$X = [i_r \ \lambda_r]^T \quad v_r = [v_{d*} \ v_{q*}]^T$$

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

$$A_{11} = \left\{ -\frac{R_r}{\sigma L_r} - \frac{1-\sigma}{\sigma r_r} \right\} I$$

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

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

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

$$B_1 = \frac{1}{\sigma L_s} I$$

$$C = [I \ 0]$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

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

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$$

동일차원 2차자속 관측기는 고정자전류의 추정 오차를 수 정 피드백 항으로 부가하여 식 (3)으로 나타낸다.

$$\dot{\hat{X}} = \hat{A}\hat{X} + Bu_r + G(\hat{i}_r - i_r) \quad (3)$$

관측기의 국이 유도전동기 고유의 국에 대해 비례하도록 설정한다면, 가변극배치 동일차원 2차자속 관측기를 구성 할 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 \\ g_2 & g_1 \\ g_3 & -g_4 \\ g_4 & g_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$g_1 = (k-1)\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1}{\sigma L_r}\right)$$

$$g_2 = (k-1)\omega_r$$

$$g_3 = (k^2-1)\left(\frac{L_r}{M}(R_r + \frac{(1-\sigma)L_s}{\tau_r}) + \frac{1}{\tau_r}\right)$$

$$- \frac{\sigma L_s L_r}{M}(k-1)\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1}{\sigma L_r}\right)$$

$$g_4 = \frac{\sigma L_s L_r}{M}(k-1)\omega_r$$

동일차원 2차자속 관측기에 속도에 관한 동정 기구를 첨가하고 동정 기구의 안정성을 확보하기 위해서 Lyapunov의 안정도 판별법을 이용하여 동정기의 구성은 다음과 같다.

$$\widehat{\omega}_r = K_{sp}(e_{id}\widehat{\lambda}_{dr} - e_{iq}\widehat{\lambda}_{dr}) + K_{si}\int(e_{id}\widehat{\lambda}_{dr} - e_{iq}\widehat{\lambda}_{dr})dt \quad (5)$$

여기서,  $e_{id} = i_{dr} - i_{ds}$ ,  $e_{iq} = i_{qr} - i_{qs}$ 이다.

### III. 회전자자저항의 동정

회전자자속관측기를 구성하고 이들의 실제치와 추정치를 오차신호로하여 회전자자저항을 동정하는 적용 동정식을 도출하며 적용동정식의 안정성을 Lyapunov의 안정도 이론으로 확인한다. 회전자자속관측기에서 다음과 같은 관측기를 구성한다.

$$\bar{\lambda}_{dr} = -\frac{R_{re}}{L_r} \lambda_{dr} + \frac{R_{re}M}{L_r} i_M \quad (6)$$

$$\widehat{\lambda}_{dr} = -\frac{R_{re}}{L_r} \lambda_{dr} + \frac{R_{re}M}{L_r} i_M + g(\widehat{\lambda}_{dr} - \lambda_{dr}) \quad (7)$$

상태 변수의 추정 오차를  $e = \lambda_{dr} - \widehat{\lambda}_{dr}$  라하고, 추정 오

차( $\Delta R_{re}$ )를 고려하면 위의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e} = \left(-\frac{R_{re}}{L_r} + g\right)e + \frac{\Delta R_{re}}{L_r} \widehat{\lambda}_{dr} - \frac{\Delta R_{re}M}{L_r} i_M \quad (8)$$

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

$$V = e^T e + f \quad (9)$$

$V$ 의 시간 미분을 구하면 다음식과 같다.

$$\dot{V} = \dot{e}^T e + e^T \dot{e} + f$$

$$= e^T \left[ -\frac{R_{re}}{L_r} + g \right] e - 2e^T \left[ -\frac{\Delta R_{re}}{L_r} \widehat{\lambda}_{dr} + \frac{\Delta R_{re}M}{L_r} i_M \right] + f \quad (10)$$

식 (10)에서 우변 제 1항의 부정성은 관측기 국을 안정하도록 좌방평면에 설계되기 때문에 만족되며, 우변의 나머지 항의 부정성에 관하여 조사한다. 회전속도에 대한 적응 칙을 식 (11)로 정의한다.

$$\widehat{R_{re}} = -K e^T \left[ -\widehat{\lambda}_{dr} + M i_M \right] \quad (11)$$

그리고 함수  $f$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$f = \frac{(\Delta R_{re})^2}{L_r K} \quad (12)$$

$$f = \frac{2\Delta R_{re} \cdot \Delta \widehat{R_{re}}}{L_r K} = \frac{2\Delta R_{re} \cdot \widehat{R_{re}}}{L_r K} \quad (13)$$

식(10)의 나머지 항을 정리하면 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} & -2e^T \left[ -\frac{\Delta R_{re}}{L_r} \widehat{\lambda}_{dr} + \frac{\Delta R_{re}M}{L_r} i_M \right] + f \\ & = -2e^T \left[ -\frac{\Delta R_{re}}{L_r} \widehat{\lambda}_{dr} + \frac{\Delta R_{re}M}{L_r} i_M \right] \\ & \quad + \frac{2\Delta R_{re} \cdot [-Ke^T(-\widehat{\lambda}_{dr} + M i_M)]}{L_r K} = 0 \quad (14) \end{aligned}$$

따라서 Lyapunov의 안정도 이론은 확립되었으며 도출된 적용동정식을 이용하여 회전자자저항을 동정할 수 있다. 그러나 회전자자저항 동정식은 서론에서 언급하였듯이 회전자자속이 변화하는 과도상태에서만 만족하고 다른 구간에서는 안정성(Stability)을 보장할 수 없으므로 locally stable이라 할 수 있으나 globally stable은 보장하지 못한다. 따라서 본 동정식을 구현하기 위해서는 추정된 회전자자속이 과도상태에서 선형적으로 변화하여야 하며 또한 회전자자속의 실제치 대신 회전자자속 추정치를 사용하기 때문에 회전자자속 추정치는 회전자자저항 변동으로 인하여 포화가 발생하지 않는다는 전제조건이 있어야 한다. 그러므로 본 알고리즘을 통하여 근사적인 회전자자저항을 동정할 수 있다.

#### IV. 모의실험 및 결과

제안하는 알고리즘을 이용한 속도센서리스 벡터제어계의 전체 불특도는 그림 1과 같다. 모의실험에 적용된 3상 유도전동기의 사양은 표 1과 같다. 제어기의 성능을 평가하기 위하여 600rpm을 인가하였을 때의 속도응답특성을 살펴보았다. 그림 2는 회전자저항변동을 200%로 하였을 경우의 속도응답특성이다. 회전자저항의 오차에 따라 초기과 도상태에서 추정속도오차가 증가하고 있음을 볼 수 있으며 정상상태에서도 파형에서도 눈으로는 차별이 미흡하지만 테이터에 의하면 수 % 이상 속도오차가 여전히 존재하고 있음을 볼 수 있다. 그림 3은 제안된 알고리즘을 이용하여 회전자저항변동분을 보상하였을 때의 추정속도, 실제속도 및 회전자저항 추정치의 파형이다. 과도상태에서 약간의 추정오차가 존재하고 있으나 시간이 지난후 회전자저항변동에 대한 보상으로 이로 인한 영향이 거의 없음을 볼 수 있다. 또한 과도상태에서의 속도응답시간도 빠르게 개선되고 있음을 알 수 있다. 그림 (b)에서는 자속관측기의 상태량으로서 회전자저항의 추정치가 매우 양호하게 추정되고 있음을 볼 수 있다. 그림 4는 그림 3과 동일한 조건하에서  $K_a=6.5$ 로 하였을 경우의 속도응답특성 파형이다. 그림 3에서의 응답특성보다 매우 개선되고 있음을 볼 수 있다. 그림 5는 제안된 알고리즘의 회전자저항 추정성능을 통하여 회전자저항의 지령을 각각 100%, 50%로 주었을 경우의 파형이다. 파형에서 볼 수 있듯이 넓은 회전자저항변동 영역에서 추정오차없이 양호하게 추정되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 본 알고리즘이 초기 동작점을 자주 갖는 시스템에 적용된다 할 때 유도전동기의 속도제어 분야 및 위치제어 분야에 유용하리라고 본다. 그러나 제안된 알고리즘의 적용영역이 초기과도상태뿐이므로 정상상태에서도 적용 가능한 알고리즘을 개발하는 것이 추후 과제라고 사료된다.

표 1. 모의실험에 적용된 파라미터

정격전압	220/380V	$R_t$	0.52Ω
정격전류	4.8/8.3A	$R_s$	1Ω
정격속도	1720rpm	$L_s$	110mH
출력력	2.2kW	$L_t$	103mH
극수	4pole	M	103mH

#### V. 결론

본 연구에서는 적용제어 알고리즘을 이용하여 회전자저항 동정을 갖는 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어를 행하였다. 속도센서리스 벡터제어계를 구현하기 위하여 적용동일차원 자속관측기를 이용하였으며 회전자저항을 동정하기 위해서 회전자자속관측기를 구성하고 적용동정학의 안정성을 Lyapunov의 안정도 이론으로 확인하였다. 그리고 회전자저항변동에 대한 보상을 실시함으로서 회전속도의 추정성능을 향상시킬 수 있었으며, 회전자저항 변동시 회전자저항의 추정성능이 50%부터 200%까지 양호하게 추정되고 있음을 볼 수 있었다. 추후과제로는 과도상태뿐만 아니라 정상상태에서도 회전자저항을 동정할 수 있도록 하는 향후 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] Colin Scuder,"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] Hsiao 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.
- [6] S. Shirnaka, "A Unified Analysis on Simultaneous Identification of Velocity and Rotor Resistance of Induction Motors," T. IEE Japan, vol. 113-D, no.2, pp. 1483-1484, 1993.

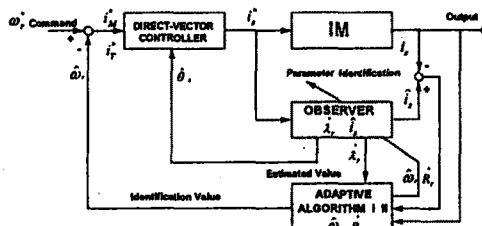


그림 1. 전체시스템 구성도

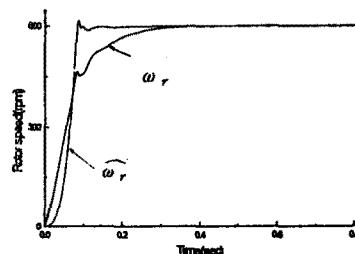
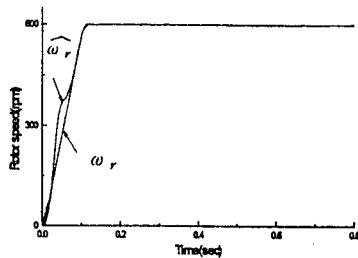
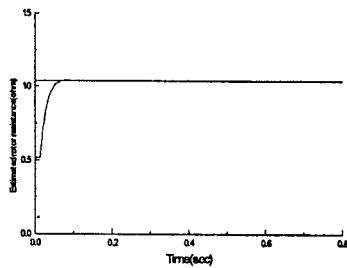


그림 2. 회전자저항 변동(200%)을 주었을때 실제속도 및 추정속도( $K=1.1$ ,  $K_a=2$ ,  $K_w=11.5$ )



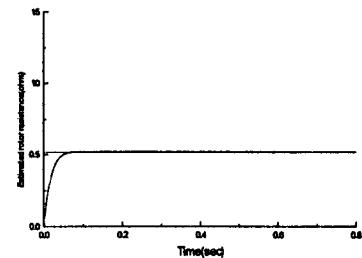
(a)



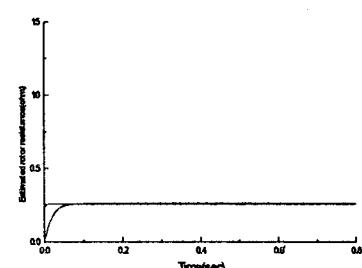
(b)

그림 3. 회전자저항 변동(200%)을 주었을 때 보상된 시스템( $K=1.1$ ,  $K_{\omega P}=2$ ,  $K_{\omega F}=11.5$ )

- (a) 실제속도 및 추정속도
- (b) 회전자저항 추정치



(a)



(b)

그림 5. 회전자저항이 각각 100%, 50%일 때의 회전자저항의 추정치 (a)  $R_r=R_f$  (b)  $R_r=0.5R_f$

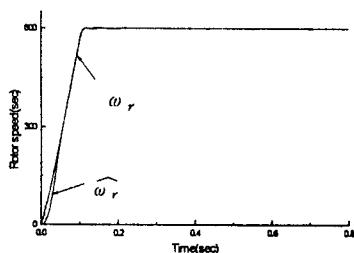


그림 4. 회전자저항 변동(200%)을 주었을 때 보상된 시스템의 실제속도 및 추정속도( $K=1.1$ ,  $K_{\omega P}=2$ ,  $K_{\omega F}=6.5$ )