

## RLS 부하 토크 관측기를 가진 유도전동기의 센서리스 벡터제어

김윤호\*, 국운상\*

\*중앙대 전기공학과 전력전자 연구실

홍의표\*\*, 최창호\*\*

\*\*포스콘 기술연구소 전력전자 연구실

### Speed-Sensorless Vector Controlled IMs with RLS Torque Observer

Yoon-Ho Kim, Yoon-sang Kook

Dept. of Electrical Engineering in CAU

Ik-Pyo Hong, Chang-Ho Choi

POSCON co. Power Electronics R&D Center

**Abstract** - Speed sensors are required for the vector control of induction motors. These sensors reduce the sturdiness of the system and make it expensive. Therefore, a drive system without speed sensors is required. Also, the rotor inertia constant, the damping constant and the disturbed load torque of the IM are estimated by the RLS estimator and a torque observer. Then the observed disturbance torque is fed forward to increase the robustness of the IM speed drive.

#### 1. 서론

본 논문에서는 속도 검출기를 사용하는 경우의 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 기존 센서리스 알고리즘들의 일반적인 문제점- 저속에서의 불안정성 문제, 과도 상태에서의 동 특성 문제, 부하변동의 강인성 그리고 파라미터 변동에 대한 민감성-등을 해결하는 것에 연구의 목표를 두었다.

본 논문에서 제안된 방식은 적응제어 이론에 기초한 속도 적응 자속 관측기를 이용하여 고정좌표계 상의 전류와 자속을 추정함으로써, 속도에 대한 적응법칙을 유도하고, 이를 이용하여 관측기를 수정함으로써 실제 회전자 속도에 수렴하도록 제어하는 방식으로 알고리즘이 구성되었다. 따라서 이 방식에서는 5[rpm] 이상의 속도 영역에서 우수한 정역운전 특성은 물론, 부하의 변동에도 강인한 특성을 지니는 제어를 비교적 손쉽게 구현할 수 있는 장점을 지니고 있다.

제안된 모든 알고리즘의 타당성 및 구현 가능성을 입증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 실제적인 현장 응용 가능성 및 실용성을 확인하였다.

#### 2. 기존의 속도 센서리스 알고리즘의 비교 분석

본 논문에서는 속도 센서 없는 유도전동기의 벡터 제어에 대한 여러 가지 방식을 비교 검토하고, 특정 분야에서 적절한 방식을 선택하는데 이용될 수 있도록 각 추정 방식의 장점을 선별하는 일련의 기준에

따라서 결과치를 비교하였다.

- I. 속도 추정기(Speed Estimator)
- II. 속도 관측기(Speed Adaptive Flux Observer)
- III. 칼만 필터 기술(Kalman Filter Technique)
- IV. 모델 기준 적응 시스템(Model Reference Adaptive System)

다음은 이들 7가지의 평가기준을 나열한다.

- 1) 정상상태 오차 (Steady State Error (STE))
- 2) 동 특성 (Dynamic Behavior (DB))
- 3) 저속 운전 (Low Speed operation (LS))
- 4) 파라미터 민감도 (Parameters Sensitivity (PS))
- 5) 노이즈 민감도 (Noise Sensitivity (NS))
- 6) 복잡도 (Complexity (C))
- 7) 계산시간 (Computation Time (CT))

표 1에서는 각 방식의 “평가기준”을 나타낸다. 여기서 “1”은 가장 좋은 특성을, “5”는 가장 나쁜 특성을 의미한다.

표 1. 속도 센서리스 시스템의 비교 결과

	STE	DB	LS	PS	NS	C	CT
SE	2	3	3	2	4	2	3
SAFO	1	2	2	1	2	3	3
KFT	1	1	2	2	2	2	2
MRAS	2	2	2	2	1	4	5

#### 3. RLS부하 토크 관측기를 가진 속도 추정을 위한 제안된 속도 센서리스 적응법칙

##### 3.1 유도전동기의 수학적 모델

유도전동기는 고정 좌표계 상에서 다음과 같은 상태 방정식으로 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\chi} &= A\chi + Bv_s \\ i_s &= C\chi \end{aligned} \quad (1)$$

##### 3.2 속도 센서리스 알고리즘

고정자 전류와 회전자 자속을 함께 추정하는 상태 관측기는 다음과 같은 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = \hat{A} \hat{x} + B u_s + G(i_s - i_s) \quad (2)$$

여기서,  $\hat{\cdot}$ 는 추정된 값을 의미하고  $G$ 는 식 (1)이 안정될 수 있도록 결정되는 관측기 이득 행렬이다.

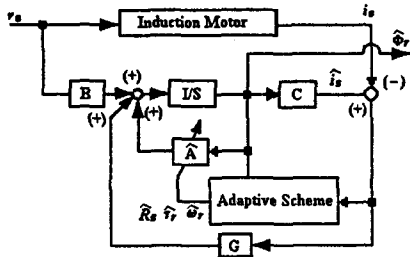


그림 1. 속도 적응관측기의 블록다이어그램.

그림 1에 보인 적응 관측기는 행렬  $\hat{A}$ 에서 회전자 속도  $\hat{\omega}_r$ 을 추정하기 위한 적응 계획이다. 다음은 추정된 회전자 속도를 나타낸다.

$$\hat{\omega}_r = K_p (e_{ids} \hat{\phi}_{qr} - e_{iqs} \hat{\phi}_{dr}) + K_I \int (e_{ids} \hat{\phi}_{qr} - e_{iqs} \hat{\phi}_{dr}) dt \quad (3)$$

여기서  $K_p$ ,  $K_I$ 는 임의의 양의 이득이다.  $e_{ids} = i_{ds} - \hat{i}_{ds}$ ,  $e_{iqs} = i_{qs} - \hat{i}_{qs}$ 는 측정된 값과 추정된 값의 차이로 계산된 전류 오차이다.

### 3.3 속도 추정을 위한 관측기 이득 선정

관측기의 이득 행렬  $G$ 는 관측기의 극이 유도전동기의 극에 비례하도록 다음과 같은 방정식으로 계산될 수 있다.

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

### 3.4 파라미터 변동을 고려한 고정자 저항의 보상

속도 추정과 토크 제어에 대한 파라미터의 변동에 대한 영향을 보상하기 위하여 파라미터에 대한 추정이 필요하다.

$$\frac{d}{dt} \hat{R}_s = -\lambda_1 (e_{ids} \hat{i}_{ds} + e_{iqs} \hat{i}_{qs}) \quad (5)$$

$$\hat{R}_r = R_{sm} \hat{R}_s \quad (6)$$

여기서  $\lambda_1$ 은 임의의 양의 상수이고,  $R_{sm}$ 은 고정자와 회전자 저항의 명목상의 값의 비이다.

### 3.5 RLS 부하 토크 관측기

본 논문에서 제안된 RLS 추정기의 블록다이어그램은 그림 2와 같다.

$$\hat{\omega}_r(k+1) = -a_1 \hat{\omega}_r(k) + b_1 i_{qs}^*(k) \quad (7)$$

$$\text{여기서, } a_1 = -e^{-(\hat{\beta}/J)T_s}, \quad b_1 = \frac{K_t}{B} \left(1 - e^{-(\hat{\beta}/J)T_s}\right)$$

RLS 추정기는 다음과 같다.

$$z(k) = z(k-1) + K(k) [\hat{\omega}_r(k) - H(k) z(k-1)] \quad (8)$$

$$K(k) = P(k-1) H^T(k-1) [1 + H(k-1) P(k-1) H^T(k-1)]^{-1} \quad (9)$$

$$P(k) = \frac{1}{\alpha} [I - K(k) H(k-1)] P(k-1) \quad (10)$$

여기서  $H(k) = [\hat{\omega}_r(k) \quad i_{qs}^*(k) - \hat{T}_L / K_t]$ ,  $z(k) = [-a_1(k) \quad b_1(k)]$ 이고,  $0 < \alpha \leq 1$ 이다.

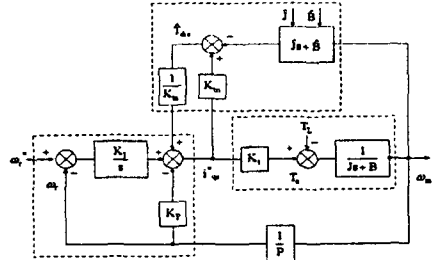


그림 2. RLS 부하 토크 관측기의 블록선도

## 4. 디지털 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 배경

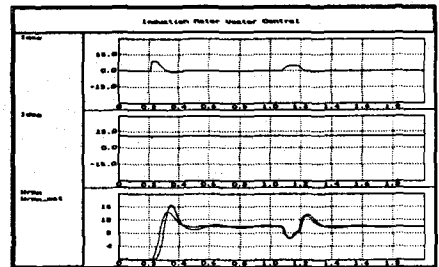
본 논문에서는 여러가지 센서리스 방식의 비교 검토 결과 제안된 센서리스 알고리즘의 타당성을 고찰하기 위해 디지털 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 정격과 파라미터 값들은 표 2에 나타내었다.

표 2 유도전동기의 상수

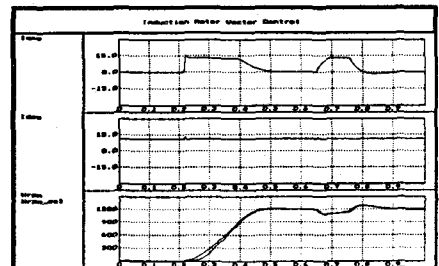
정격출력	22kW	$L_s$	28.7mH
정격속도	2000rpm	$L_r$	29.1mH
정격토크	15.51Nm	$L_m$	27.1mH
$R_s$	0.407	$J_M$	0.0179kgm <sup>2</sup>
$R_r$	0.4445	$P$	4

### 4.2 시뮬레이션 결과

그림 2에서는 부하 인가시 속도 응답 특성을 나타내었다. 그림 3에는 유도전동기 회전자 저항이 각각 +20%, 0%, -20%씩 변한 경우의 속도 추정 결과이다.



(a)



(b)

그림 3. 회전자표계 d-q 축 전류( $I_q^e, I_d^e$ )파형.

- (a) 속도 명령치 10rpm( $T_L : 5Nm$ )
- (b) 속도 명령치 1200rpm( $T_L : 15Nm$ )

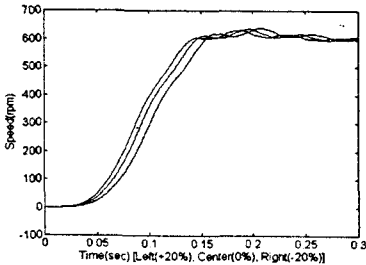


그림 4. 회전자 저항의 변동에 따른 민감도.

5. 실험 결과

5.1 시스템 구성

본 논문에서 구성된 전체 하드웨어 시스템은 그림 4와 같이 나타내었다.

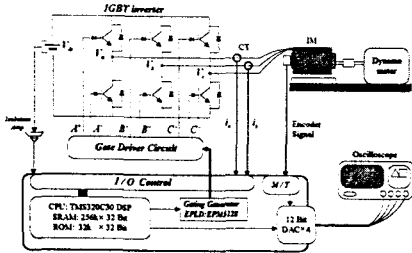


그림 5. 유도 전동기의 전체 구동 시스템.

5.2 실험결과

그림 6과 7에는 제안된 센서리스 알고리즘의 정역 운전 특성이 도시되어 있다. 그림 8은 RLS 부하 관측기의 동작특성을 보인다. 본 알고리즘은 관측기의 극배치를 속도 영역에 따라서 이동시키기 때문에 비교적 안정된 정역운전이 이루어 질 수 있음을 알 수 있다. 이 실험과형으로부터 제안된 알고리즘의 부하 조건에 관계없이 정역운전 특성을 확인할 수 있다.

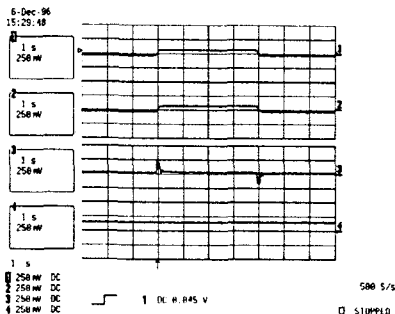


그림 6. 적응관측기의 동작 특성 (-10→+10→-10[rpm]).

- (1)(2)실제 및 추정된 전동기 속도
- (3)(4) 자속 전류 및 토크 전류

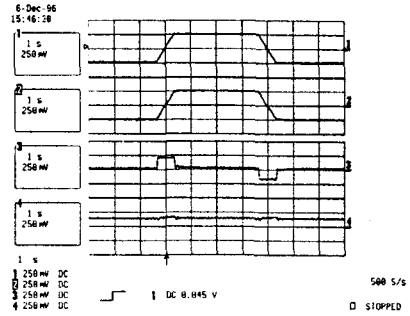


그림 7. 적응관측기의 동작 특성 (-500→+500→500[rpm]).

- (1)(2)실제 및 추정된 전동기 속도
- (3)(4) 자속 전류 및 토크 전류

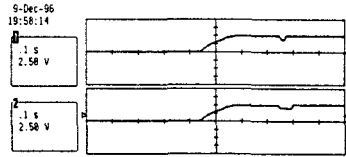


그림 8. RLS 부하관측기의 동작 특성  
(1) RLS 부하 관측기가 있는 경우  
(2) RLS 부하 관측기 없는 경우

6. 결론

본 논문에서는 고성능 운전 능력을 필요로 하는 IM 가변속 구동 시스템의 센서리스 제어를 위한 새로운 알고리즘에 관하여 연구하였다. 아래에 본 논문에서 제안하는 새로운 IM 센서리스 알고리즘을 정리한다.

- (1) 광범위한 속도 제어 영역에서 부하조건에 무관하게 정상적인 제어를 수행할 수 있는 고성능 제어 알고리즘의 구현.
- (2) 안정된 정역 운전 능력.
- (3) 전동기 제 정수 변동의 영향 최소화.
- (4) 구현이 간단한 실용적인 알고리즘 개발.

[참고문헌]

[1] H.Kubota, and K.Matsuse, "Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation", in Conf. Rec. of IEEE IAS Annual Meeting, pp. 414-418, 1993  
 [2] F.-J.Lin "Robust speed-controlled induction-motor drive using EKF and RLS estimator", IEE Proc-Electr. Power Appl. Vol 143, No. 3, pp. 186-192, May 1996