

# 병렬형 칼만 필터를 사용한 영구 자석 동기 전동기의 센서리스 제어

張診洙<sup>\*</sup>, 朴炳建<sup>\*\*</sup>, 金泰成<sup>\*\*\*</sup>, 李東明<sup>\*\*\*\*</sup>, 玄東石<sup>†</sup>

## PMSM Sensorless Control using Parallel Reduced-Order Extended Kalman Filter

Jin-Su Jang, Byoung-Gun Park, Tae-Sung Kim, Dong-Myung Lee and Dong-Seok Hyun

### 요 약

본 논문에서는 병렬형 칼만 필터를 사용한 영구 자석 동기 전동기의 새로운 센서리스 제어 기법이 제안되었다. 제안된 기법은 기존의 확장형 칼만 필터(EKF)와는 달리 reduced-order EKF를 이용한 역기전력 추정 알고리즘을 통해 회전자 위치와 속도를 추정할 수 있고, 각각의 샘플링 시간마다 서로 다른 EKF를 실행하는 병렬형 구조를 사용함으로써 연산시간을 월등히 줄일 수 있다. 따라서 제안된 기법은 기존 EKF의 장점은 그대로 유지하며 단점으로 지적되었던 긴 연산시간 문제를 극복하고 쇄교 자속 값에 민감한 부분도 부분적으로 해결할 수 있다. 또한 운전 영역에 따라 그 형태를 달리함으로써 회전자 속도 및 위치를 안정적으로 추정할 수 있다. 제안된 기법은 실험 결과를 통하여 그 타당성이 검증되었고, 기존 EKF와의 연산 시간 비교를 통하여 우수성이 확인되었다.

### ABSTRACT

This paper proposes a novel sensorless control scheme for a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) by using a parallel reduced-order Extended Kalman Filter. The proposed scheme can obtain rotor position and speed by back-EMF that is estimated by reduced-order EKF and save computation time greatly due to using a parallel structure that works by turns every sampling time. Therefore, proposed scheme has merits of conventional EKF, and problems of parameter sensitivity are partially overcome. And proposed scheme can safely estimate rotor speed and position by using new algorithms according to driving regions. Experimental results show the validity of the proposed estimation technique, and to verify the merit of the proposed scheme, a comparison of a new reduced-order EKF algorithm with a conventional EKF algorithm has been also made in terms of computation time.

**Key Words** : Permanent Magnet Synchronous Motor, Sensorless Control, Extended Kalman Filter

## 1. 서 론

영구 자석 동기 전동기(PMSM)는 보수성, 제어성, 내환경성이 우수하고 고효율, 고역률 운전이 가능한 전동기로서 다양한 산업 및 가전 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 PMSM의 구동을 위해서는 엔코

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, 한양대 전기제어생체공학부 교수

E-mail : dshyun@hanyang.ac.kr

<sup>\*</sup>학생회원, 한양대 대학원 전기공학과 석사과정

<sup>\*\*</sup>정희원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정

<sup>\*\*\*</sup>정희원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정

<sup>\*\*\*\*</sup>정희원, 홍익대 전자전기공학부 조교수

접수일자 : 2008. 6. 16 1차 심사 : 2008. 7. 2

심사완료 : 2008. 8. 1

더나 레졸버와 같이 회전자 위치를 검출할 수 있는 위치 센서가 필요하다. 하지만 이러한 센서들은 제품의 부피 및 가격을 상승시키고 주위 온도나 환경에 따라 그 특성이 변화하는 단점을 가지고 있다. 이에 대한 해결책으로 위치 센서가 필요 없는 다양한 센서리스 제어 기법들이 연구되어 왔다. 센서리스 제어 기법에 있어서 확장형 칼만 필터(EKF)는 빠른 응답 특성과 적은 오차를 갖으며, 실시간으로 파라미터 추정을 할 수 있는 장점을 가지고 있지만<sup>[3]</sup>, 알고리즘의 복잡성으로 인해 연산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 비록 고성능 프로세서의 발달로 EKF를 이용한 센서리스 제어 기법의 구현에는 문제가 없지만 일반 가전제품이나 저가격 제품에 고성능 프로세서를 사용하기에는 경제성이 떨어진다. 또한 상용화 되는 제품들에는 센서리스 제어 알고리즘 이외에도 고장 검출 프로그램이나 사용자를 위한 여러 가지 프로그램들이 요구되기 때문에 프로세서 연산 부담이 커지게 된다. 따라서 EKF를 사용한 센서리스 제어 기법을 상용화시키기 위해서는 연산시간을 줄이는 것이 필수적이다.

이러한 EKF의 긴 연산시간 문제를 해결하기 위해 여러 가지 reduced-order EKF가 연구되어 왔다<sup>[7]-[9]</sup>. 2x2행렬을 가진 reduced-order EKF가 제안되었지만<sup>[8]</sup> 센서리스 제어법이 아닌 파라미터 추정을 위한 EKF였고, 3x3행렬로 이루어진 reduced-order EKF 센서리스 제어 기법은<sup>[7]</sup> 출력 측 방정식이 복잡하여 구현에 어려움이 예상된다. 본 논문에서는 기존의 full-order EKF 대신 reduced-order EKF를 병렬로 사용한 새로운 센서리스 제어 기법이 제안되었다. 제안된 기법은 운전 영역에 따라 그 형태를 달리함으로써 회전자 속도 및 위치를 안정적으로 추정할 수 있고, 저속 운전 영역에서는 2x2행렬로 이루어져 연산시간을 크게 줄일 수 있다. 또한 역기전력 추정 알고리즘을 통해 쇄교 자속에 대한 민감성 부분을 부분적으로 해결하였고, 실험 결과를 통하여 그 타당성이 검증되었다. 마지막으로 기존 EKF와의 연산 시간 비교를 통하여 제안된 기법의 우수성이 확인되었다.

## 2. PMSM 센서리스 제어를 위한 EKF 모델링

### 2.1 PMSM 시스템 방정식

그림 1은 PMSM 구동 시스템의 등가회로를 보여준다.

다. 정지 좌표계를 기준으로 한 PMSM 시스템 방정식은 다음과 같다.

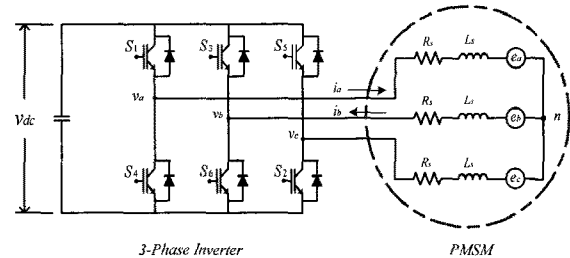


그림 1 PMSM 구동 시스템 등가회로  
Fig. 1 PMSM drive system equivalent circuit

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}i_\alpha &= -\frac{R_s}{L_s}i_\alpha - \frac{e_\alpha}{L_s} + \frac{v_\alpha}{L_s} \\ \frac{d}{dt}i_\beta &= -\frac{R_s}{L_s}i_\beta - \frac{e_\beta}{L_s} + \frac{v_\beta}{L_s} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $e_\alpha$ 와  $e_\beta$ 는 각각  $-\lambda_m \omega_r \sin \theta_r$ 과  $\lambda_m \omega_r \cos \theta_r$ 에 해당하는 역기전력 성분이다.

전동기가 저속 운전 시에는 한 샘플링 내에서  $e_\alpha$ 와  $e_\beta$ 의 변화량이 0에 가깝기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ e_\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} -R_s & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ e_\alpha \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_\alpha \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\beta \\ e_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} -R_s & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\beta \\ e_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_\beta \quad (3)$$

여기서,  $i_\alpha, i_\beta$ 는 출력값이고  $e_\alpha, e_\beta$ 는 추정값이며, 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $x(t)=[i_\alpha \ e_\alpha]^T$  혹은  $[i_\beta \ e_\beta]^T$  이고,  $u(t)=[v_\alpha]$  혹은  $[v_\beta]$ 이며 입력값이다. 또한  $y(t)=[i_\alpha]$  혹은  $[i_\beta]$ 는 출력값이고 A, B, C는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0] \quad (5)$$

하지만, 전동기가 고속 운전 시에는 한 샘플링 내에서  $e_\alpha$ 와  $e_\beta$ 의 변화량이 0이 아니므로

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} -R_s & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -L_s \omega_r \\ 0 & L_s \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_\alpha \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\beta \\ e_\beta \\ e_\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} -R_s & -1 & 0 \\ 0 & 0 & L_s \omega_r \\ 0 & -L_s \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\beta \\ e_\beta \\ e_\alpha \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_\beta \quad (7)$$

과 같이 표현할 수 있다. 위의 식들을 바탕으로 상태 방정식을 구성하여 EKF 알고리즘에 사용하면  $e_\alpha$ 와  $e_\beta$ 를 쉽게 추정할 수 있게 된다.

### 2.2 확장형 칼만 필터 알고리즘

EKF의 디지털 구현을 위해, 시스템 방정식을 이산화하면,

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F(k)x(k) + G(k)u(k) \\ y(k) &= H(k)x(k) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $F(k)=I+A \cdot T_s$ ,  $G(k)=B \cdot T_s$ ,  $H(k)=C$ 이고, 외란을 포함한 비선형 이산화 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), u(k)) + w(k) \\ y(k) &= hx(k) + v(k) \end{aligned} \quad (9)$$

$w(k)$ 와  $v(k)$ 는 각각 공분산 행렬 Q와 R에 대응되는 시스템 외란이며, EKF 알고리즘은 다음과 같다.

1) Time update (predict) step:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1|k) &= F(k)\hat{x}(k|k) + u(k) \\ P(k+1|k) &= F(k)P(k|k)F^T(k) + Q(k) \end{aligned} \quad (10)$$

2) Measurement update (correct) step:

$$\begin{aligned} K(k+1) &= P(k+1)H^T(k+1) \\ &\quad \times [H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \\ \hat{x}(k+1|k+1) &= \hat{x}(k+1|k) \\ &\quad + K(k+1)[y(k+1) - H(k+1)\hat{x}(k+1|k)] \\ P(k+1|k+1) &= [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1|k) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $P$ 는 공분산 행렬이고  $K$ 는 칼만 이득이다.  $(k+1|k)$ 는 이전 상태의 추정값이고,  $(k+1|k+1)$ 는 현재 상태의 새로운 추정값이다.

### 2.3 속도 및 위치의 추정

$e_\alpha$ 와  $e_\beta$ 를 이용한 회전자 위치 및 속도를 추정하는 방법은 다음과 같다.<sup>[10]</sup> 서론에서 언급한 바와 같이 쇄교 자속에 대한 민감성 부분이 식(12)를 통하여 위치검출 시 쇄교 자속의 변화에 영향을 받지 않게 됨으로써 해결되고, 식(13)을 통하여 속도를 추정할 수 있게 된다.

$$\frac{-e_\alpha}{e_\beta} = \frac{\lambda_m \omega_r \sin \theta_r}{\lambda_m \omega_r \cos \theta_r} = \tan \theta_r, \text{ if } \omega_r > 0, \theta_r = \theta, \quad (12)$$

$$\tan^{-1} \left( \frac{-e_\alpha}{e_\beta} \right) = \theta_r, \quad \text{else } \omega_r < 0, \theta_r = \theta_r + \pi.$$

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{1}{\lambda_m} \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \text{sign}(\omega_r) \\ \text{if } \theta_r(n) - \theta_r(n-1) > 0, \text{sign}(\omega_r) &= 1 \\ \text{else } \theta_r(n) - \theta_r(n-1) < 0, \text{sign}(\omega_r) &= -1. \end{aligned} \quad (13)$$

## 3. 제안된 센서리스 기법

본 논문에서는 기존의 full-order EKF 대신에 병렬형 reduced-order EKF를 제안하였다. 병렬형 EKF란 두 개의 EKF가 각각의 샘플링 시간마다 번갈아 연산을 수행하는 형태로, 현재 상태에서 연산을 행하는 EKF는 이전 상태의 EKF에 저장된 데이터를 현재의 값에 취합하여 새로운 데이터를 만드는 형식이다. 이러한 구성은 겉으로 보기에 두개의 EKF가 동작하는 것 같지만 각각의 샘플링 시간마다 하나의 EKF만을 사용하므로 연산시간은 하나의 EKF를 사용하는 것과 동일하다. 또한 속도 제어가 안정적으로 이루어 질 수 있도록 전동기 운전 영역에 따라 그 운전 기법을 달리 하는 방법이 추가되었다. 그림 2에는 전체적인 PMSM 구동 시스템의 센서리스 제어 알고리즘이 나와 있다.



표 1 PMSM 파라미터  
Table 1 PMSM Parameters

관성	$J$	0.0007 [kg · m <sup>2</sup> ]
마찰 계수	$B$	0.0001 [N · m/rad/s]
저항	$R_s$	4.5 [ $\Omega$ ]
인덕턴스	$L_s$	0.0027 [H]
역기전력 상수	$\lambda_f$	0.1 [V · s]
극 수	$P$	8 [pole]

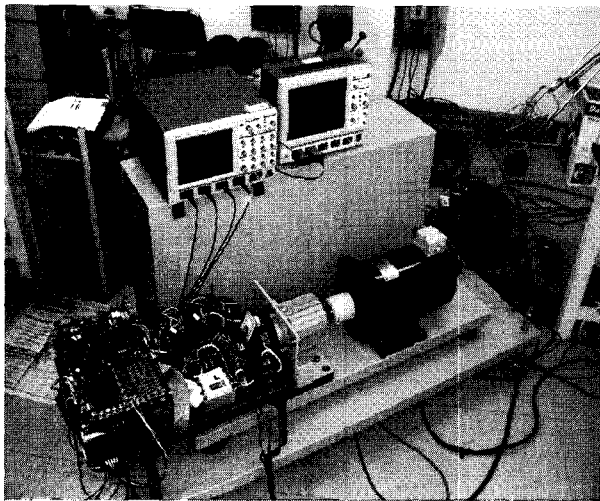


그림 6 PMSM 구동 시스템의 전체적인 실험 세트  
Fig. 6 Overall experimental set of PMSM drive system

그림 7은 초기 기동부터 1000 rpm까지의 속도 변화를 보여주고 있다. 초기에 약간의 속도 오차가 발생하지만 비교적 원활하게 추정됨을 볼 수 있다.

그림 8은 제안된 센서리스 기법의 1000 rpm에서의 위치 추정을 보여주고 있다. 이 역시 원활하게 제어가 이루어짐을 볼 수 있다.

그림 9는 500 rpm에서의 부하 변화시 토크 특성을 나타낸 그래프이다. 부하가 25%에서 50%로 변화하고 약 2초 후에 다시 25%로 변화되는 과정에서 속도 추정이 잘 이루어지고 있다.

그림 10과 11은 각각 100 rpm 에서의 속도와 위치 추정을 나타낸 그래프이다. 1000 rpm에서와 마찬가지로 회전자 속도와 위치가 저속에서도 원활하게 추정됨을 확인할 수 있다.

그림 12는 100 rpm에서 1000 rpm으로의 속도 변화를 나타낸 그래프이다. 이 역시 제안된 기법이 속도 변화에 강인한 특성을 보여줌을 알 수 있다.

위의 실험 결과들을 종합해보면 제안된 기법을 이용한 센서리스 제어가 운전 영역에 관계없이 안정적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

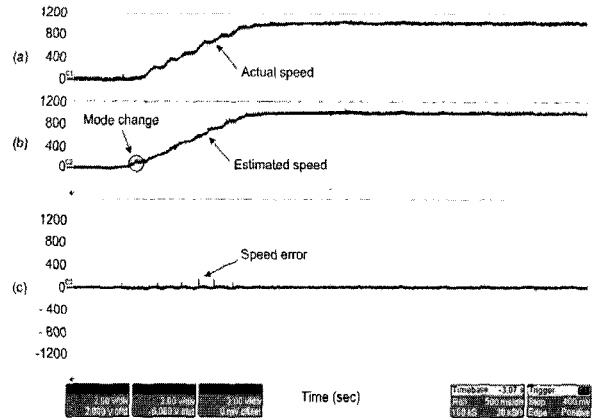


그림 7 제안된 센서리스 기법의 1000 rpm에서의 실험 결과  
(a) 실제 회전자 속도 (400 rpm / div)  
(b) 추정 회전자 속도 (400 rpm / div)  
(c) 회전자 속도 오차 (400 rpm / div)

Fig. 7 Experimental results of the proposed scheme at 1000 rpm  
(a) Actual rotor speed (400 rpm / div)  
(b) Estimated rotor speed (400 rpm / div)  
(c) Speed error (400 rpm / div)

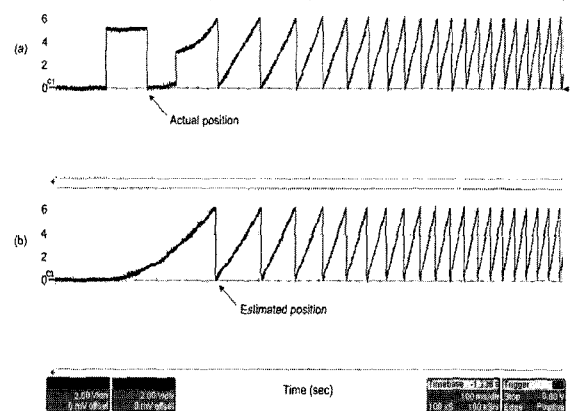


그림 8 제안된 센서리스 기법의 1000 rpm에서의 실험 결과  
(a) 실제 회전자 위치 (2 rad / div)  
(b) 추정 회전자 위치 (2 rad / div)

Fig. 8 Experimental results of the proposed scheme at 1000 rpm  
(a) Actual rotor position (2 rad / div)  
(b) Estimated rotor position (2 rad / div)

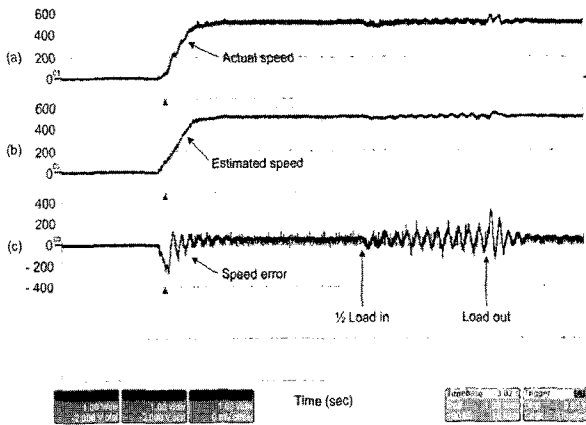


그림 9 제안된 센서리스 기법의 부하 변화 실험 결과  
 (a) 실제 회전자 속도 (100 rpm / div)  
 (b) 추정 회전자 속도 (100 rpm / div)  
 (c) 회전자 속도 오차 (100 rpm / div)

Fig. 9 Experimental results of the load variation at 500 rpm  
 (a) Actual rotor speed (100 rpm / div)  
 (b) Estimated rotor speed (100 rpm / div)  
 (c) Speed error (100 rpm / div)

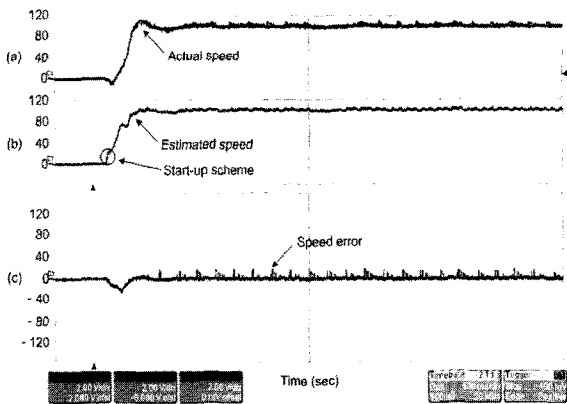


그림 10 제안된 센서리스 기법의 100 rpm에서의 실험 결과  
 (a) 실제 회전자 속도 (40 rpm / div)  
 (b) 추정 회전자 속도 (40 rpm / div)  
 (c) 회전자 속도 오차 (40 rpm / div)

Fig. 10 Experimental results of the proposed scheme at 100 rpm  
 (a) Actual rotor speed (40 rpm / div)  
 (b) Estimated rotor speed (40 rpm / div)  
 (c) Speed error (40 rpm / div)

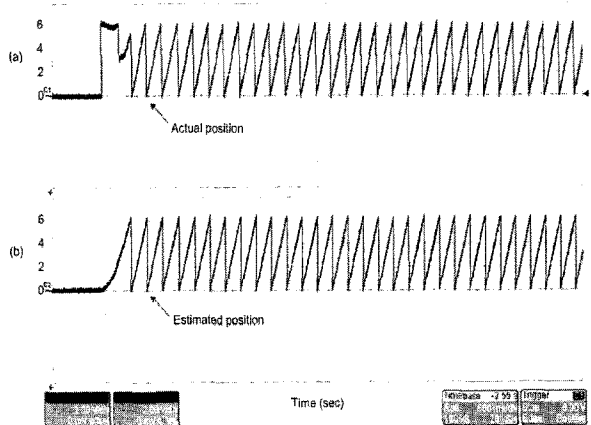


그림 11 제안된 센서리스 기법의 100 rpm에서의 실험 결과  
 (a) 실제 회전자 위치 (2 rad / div)  
 (b) 추정 회전자 위치 (2 rad / div)

Fig. 11 Experimental results of the proposed scheme at 100 rpm  
 (a) Actual rotor position (2 rad / div)  
 (b) Estimated rotor position (2 rad / div)

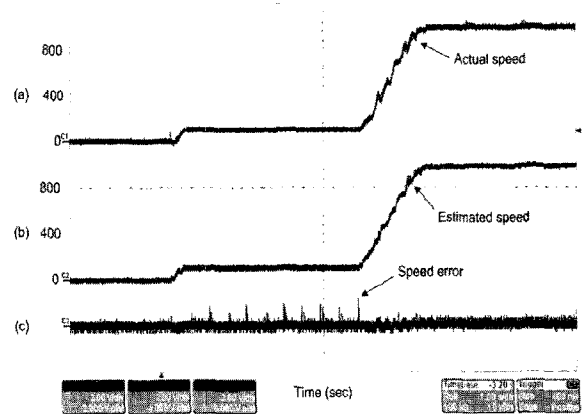


그림 12 제안된 센서리스 기법의 100 rpm에서 1000 rpm으로의 속도 변화 실험 결과  
 (a) 실제 회전자 속도 (100 rpm / div)  
 (b) 추정 회전자 속도 (100 rpm / div)  
 (c) 회전자 속도 오차 (100 rpm / div)

Fig. 12 Experimental results of the speed variation from 100 to 1000 rpm  
 (a) Actual rotor speed (400 rpm / div)  
 (b) Estimated rotor speed (400 rpm / div)  
 (c) Speed error (400 rpm / div)

## 5. 연산 시간 비교

본 논문에서 제안된 병렬형 reduced-order EKF의 우수성을 검증하기 위하여 동일한 실험 조건하에서 기존 full-order EKF와의 연산 시간 비교가 이루어 졌다. 표 2는 실험에 의해 측정된 각각의 기법에 대한 센서리스 제어 알고리즘 수행 시간을 나타낸다. 제안된 기법은 기존의 full-order EKF에 비해 저속 운전 시에는 연산시간을 46 $\mu$ s로 줄일 수 있으며 고속 운전 시에는 행렬 차수의 증가로 인하여 저속 운전 시보다 연산 시간이 다소 증가하지만 기존 full-order EKF에 비해서는 연산 시간이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

표 2 연산 시간 비교  
Table 2 Comparison of computation times

EKF 형태	구 조	행렬차수	연산시간
Full-order EKF	Single	4x4	82 $\mu$ s
저속 운전 EKF	parallel	2x2	46 $\mu$ s
고속 운전 EKF	parallel	3x3	67 $\mu$ s

## 6. 결 론

본 논문에서는 PMSM의 센서리스 제어를 위한 병렬형 reduced-order EKF가 제안되었다. 제안된 기법은 기존의 EKF가 갖고 있던 장점은 그대로 유지하고 효과적인 제어기법의 구성을 통하여 연산 시간을 월등히 줄였다. 또한 운전 영역에 따라 그 형태를 달리함으로써 회전자 속도 및 위치를 안정적으로 추정할 수 있었다. 실험결과는 제안된 기법의 센서리스 제어 구현 가능성을 보여주었고, 간단한 구조와 빠른 연산능력으로 인해 실제 상용화 되는 PMSM 제품에서도 쉽게 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. R. Dhaouadi, N. Mohan, L. Norum, "Design and implementation of an extended kalman filter for the state estimation of a permanent magnet synchronous motor", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 6, No. 3, pp. 491-497, 1991, July.
- [2] C. K. Kim, H. W. Rhew, Y. H. Kim, "Robust speed control of PMSM using Kalman filter load torque observers", in *Conf. Rec., IEEE-IECON*, pp. 918-924, 1997.
- [3] S. Bolognani, R. Oboe, M. Zigliotto, "Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-8, 1999, Feb.
- [4] B. Terzic, M. Jadric, "Design and Implementation of the Extended Kalman Filter for the Speed and Rotor Position Estimation of Brushless DC Motor", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1065-1073, 2001, Dec.
- [5] S. Bolognani, R. Oboe, M. Zigliotto, "Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives", *IEEE Trans. Ind. Applications*, Vol. 39, No. 6, pp. 1741-1747, 2002, Nov/Dec.
- [6] M. Boussak, "Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Speed Control With Initial Rotor Position Estimation for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 20, No. 6, pp. 1413-1422, 2005, Nov.
- [7] Y. H. Kim, "High Performance IPMSM Drives without Rotational Position Sensors Using Reduced-Order EKF", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, pp. 868-873, 1999.
- [8] Z.Q. Zhu, X. Zhu, P.D. Sun, D. Howe, "Estimation of Winding Resistance and PM Flux-Linkage in Brushless AC Machines by Reduced-Order Extended Kalman Filter", in *Conf. Rec., IEEE-Networking, Sensing and Control*, pp. 740-745, 2007.
- [9] Z. Zedong, L. Yongdong, M. Fadel, X. Xi, "A Rotor Speed and Load Torque Observer for PMSM Based on Extended Kalman Filter", in *Conf. Rec., IEEE-ICIT*, pp. 233-238, 2006.
- [10] J. S. Kim, S. K. Sul, "New approach for the low-speed operation of PMSM drives without rotational position sensors", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 11, No. 2, pp. 512-519, 1996, May.

저 자 소 개



**장진수(張診洙)**

1981년 2월 26일생. 2006년 건국대 전기 공학과 졸업. 2007년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석사과정.



**박병건(朴兩建)**

1979년 4월 16일생. 2005년 명지대 전기 정보제어공학부 졸업. 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**김태성(金泰成)**

1973년 7월 4일생. 1996년 광주대 전자공학과 졸업. 2002년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**이동명(李東明)**

1969년 8월 25일생. 1994년 한양대 전기 공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 Georgia Institute of Technology, ECE 졸업(공학). 1996년~2000년 LG전자(주) DA연구소 주임연구원. 2004년~2006년 삼성SDI(주) 중앙연구소 책임연구원. 2007년 한양대 전기공학과 BK 연구교수. 2008년~현재 홍익대 전자전기공학부 조교수.



**현동석(玄東石)**

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원혜공과대학 교환교수. 2003년 IEEE Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전기제어생체공학부 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.