

## 칼만 필터를 적용한 레졸버 위치 오차 보상기법

(Position Error Compensation Method for Resolvers using Kalman Filter)

안지혜\* · 안형진 · 박준열\*\*

(Ji-Hae Ahn · Hyung-Jin Ahn · Joon-Yeol Park)

### Abstract

As rotor position is a reference of coordinate in vector control of PMSM, the information of exact rotor position is required. To measure the position of motors, hall-effect sensors, encoders, resolvers, etc. are used. Among these sensors, resolvers have good endurance in the variation of circumstance and can be used in a wide range of temperature, but resolvers are less exact than encoders. In addition, resolvers have a drawback that the output signal contains periodic error components. Thus, this paper proposes a compensation method for the unique position error in resolvers using Kalman filter to achieve high performance control of PMSM. The validity of the proposed scheme is demonstrated through simulation studies.

Key Words : Resolver, Position Error, Kalman Filter, PMSM

### 1. 서 론

로봇, 항공, 군수 등 고성능 전동기 구동이 필요한 분야에서는 전동기 또는 시스템에 대한 정밀한 위치나 토크 제어가 요구되며 이를 위해서는 전동기의 순시 토크 제어가 필수적이며, 교류 전동기에서는 벡터 제어 기법 혹은 자속 기준 제어 기법으로 불리는 순시 토크 제어 기법이 이용된다[1]. 특히 영구자석 동기

전동기의 경우 회전자의 위치가 벡터 제어의 기준이 되는 자속의 위치이기 때문에 정확한 회전자 위치 정보 검출이 필요하다.

전동기의 위치를 측정하는 센서는 홀센서, 엔코더, 레졸버 등이 있다. 영구자석 전동기의 위치 검출을 위해서는 엔코더의 사용이 가능하나, 자동차와 같이 강제정렬이 허용되지 않는 경우에는 절대 위치 검출을 위한 레졸버를 통한 위치 검출이 요구된다. 레졸버는 엔코더 등의 타 센서에 비해 환경적 요인에 강하고 넓은 온도범위에서 사용 가능하다[2]. 또한 홀센서나 엔코더를 사용한 시스템에서는 전동기가 정지해 있는 경우 회전자의 위치를 알 수 없지만 레졸버를 사용하면 정지시에도 회전자의 위치를 측정할 수 있다. 그러나 엔코더에 비하여 레졸버는 정확도가 낮고 신호 처리 및 회로상의 신호 왜곡에 기인하는 레졸버 출력신

\* Main author : Dept of Electronic, Information and Communication Engineering, Hongik University, Korea, Master Course

\*\* Corresponding author : Dept of Electrical and Electronic Engineering, Hong-ik University, Korea, Professor

Tel : 02-320-3090, Fax : 02-320-1193

E-mail : parkjy@hongik.ac.kr

Received : 2014. 11. 17

Accepted : 2015. 3. 10

호의 크기 불평형과 레졸버의 구조에서 기인하는 오차 등에 의해 주기적인 오차 성분이 출력 신호에 나타나는 것이 단점이다[3]. 레졸버의 오차를 보상하기 위해서 여러 가지 기법이 소개되었다[4-8]. 이러한 기법 중 [4-5]에서는 미리 측정된 데이터를 위치에 따라 보정하는 방식과 주기 신호의 적분을 통하여 2차 정현항의 계수를 구하는 방식 등이 제시되었다. [7]에서는 레졸버 출력신호를 조절하여 위치 오차를 보상하였다. 적분이나 미리 계산된 오차 성분을 통하여 오차를 보상하는 기법이나 레졸버 출력신호의 조절을 통한 보상 기법 등은 레졸버 단품간의 차이로 인해서 대량 생산에 대응하기에는 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 레졸버의 위치 오차 성분을 모델링하고 이의 상수 값을 칼만 필터를 통하여 추정하고 보정함으로써 개별 레졸버에 적용할 수 있는 레졸버의 위치오차 보상하는 기법을 제안하고자 한다. 제안된 기법의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통해 보인다.

## 2. 레졸버의 위치 신호 오차

### 2.1 진폭 변조형 레졸버

진폭 변조형 레졸버는 입력 여자신호의 크기를 변조시켜 회전자 위치 정보를 sine, cosine 신호 형태로 출력한다. 1차측 회전자 권선에 2~10kHz의 정현파 여자 신호를 식 (1)과 같이 주입하여 2차측 전압으로 회전자 위치정보를 포함한 신호 식 (2) 및 식 (3)을 얻는다.

$$E_{R1-R2} = E \sin \omega t \tag{1}$$

$$E_{S1-S2} = KE \sin \omega t \cdot \sin \theta \tag{2}$$

$$E_{S3-S4} = KE \sin \omega t \cdot \cos \theta \tag{3}$$

여기서 E는 여자전압의 크기, K는 변압비,  $\omega$ 는 여자신호의 각속도(rad/sec),  $\theta$ 는 회전자의 위치이다. 그림 1과 같이 RDC(Resolver to Digital Converter)를 이용하여 회전자의 위치를 검출한다.

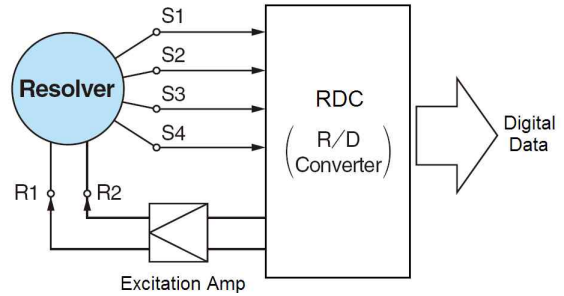


그림 1. 레졸버를 이용한 전동기 위치검출 시스템 구성도  
Fig. 1. Block diagram of motor position detection system with resolvers by RDC

### 2.2 위치 신호 오차 성분

레졸버 신호는 변압비 차이, 불평형 여자신호, 불균일한 인덕턴스 성분, 신호처리 회로상의 왜곡 등으로 인해 RDC의 출력 신호에 오차가 존재할 수 있다[6]. 이러한 오차 중 출력 신호 진폭 불평형에 의한 위치 오차는 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_{S1-S2} = KE \sin \omega t \cdot \sin \theta \tag{4}$$

$$E_{S3-S4} = KE(1 + \alpha) \sin \omega t \cdot \cos \theta \tag{5}$$

여기서  $\alpha$ 는 두 신호간의 크기 차이 정도이다. 회전자 위치정보를 추출하기 위해 각 식에  $\cos \phi, \sin \phi$ 를 곱하여 두 신호의 차동 성분을 계산하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = KE[\sin(\theta - \phi) - \alpha \cos \theta \sin \phi] \tag{6}$$

오차 성분 계산을 위해 회전자 추정위치 ( $\phi$ )를 회전자 위치 ( $\theta$ )와 일치시키면 신호 간 크기오차  $\alpha$ 로 인해 오차 성분은 식 (7)과 같이 근사화된다[6].

$$\sin \epsilon \approx \epsilon = \frac{\alpha}{2} \sin(2\theta) \tag{7}$$

한편 레졸버의 가공 오차, 취부 및 조립 오차로 인하여 두 출력 신호 간의 위상 차이가 90도를 유지하지 못함으로 인한 오차는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{s1-s2} = KE \sin \omega t \cdot \sin \theta \quad (8)$$

$$E_{s3-s4} = KE \sin \omega t \cdot \cos(\theta + \beta) \quad (9)$$

여기서  $\beta$ 는 위치 오차이다.  $\beta$ 가 충분히 작다하고 하면  $\sin \beta \approx \beta, \cos \beta \approx 1$ 이 되며, 식 (6), (7)에서와 같이  $\cos \phi, \sin \phi$ 를 곱하여 차동식을 세우고 그 값이 0에 수렴한다고 가정하면,  $\theta \approx \phi$ 인 경우, 직교오차에 의한 위치오차는 아래와 같이 근사된다.

$$\varepsilon = -\frac{\beta}{2}(1 - \cos 2\theta) \quad (10)$$

### 2.3 VR형 레졸버의 위치오차 모델링

VR(variable reluctance)형 레졸버는 여러 방식에 비해 실용성에 있어서 가장 큰 장점을 가지는데, 가벼우며 5개 정도의 부품만으로 구성되어 있다. 그러나 브러시리스 방식의 레졸버 비하여 정밀도가 낮다. 이는 VR 방식의 구조에 기인하는데, 권선을 고정자 슬롯에만 감겨있기 때문에 전자기적인 설계 자유도에 제약을 가져와 인덕턴스 고조파가 존재하게 되고, 가변 릴럭턴스가 회전자 형상에 의존하므로 가공오차의 영향을 받아 2차 출력신호 간의 직교 오차와 변압비의 불평형이 발생할 수 있기 때문이다. 이로 인하여 VR 방식의 전기오차는 일반 브러시리스 타입 레졸버에 비하여 1/5~1/3 수준이다.

VR형 레졸버는 사이즈 설계에 제한이 없고 얇기 때문에 기기의 내부에 직접 설치되는 내장형응용에 적합하다. 교류전동기에 있어서도 전동기 내부에 장착되는 경우가 많다. 본 논문의 제안 기법의 적용대상은 VR형 레졸버이다. VR형 레졸버는 앞서 기술한 것과 같은 오차가 존재하며, 이를 최소화하기 위한 여러 가지 설계 방법에도 불구하고 오차 성분이 존재한다.

2.2절에 설명된 오차 성분과 가공오차 등의 요인이 부가된 조건에서의 위치오차를 분석하면 식 (11)과 같이 위치 주기의 기본파와 2차 고조파로 모델링할 수 있다[6].

$$\theta_E = \psi_1^0 \cdot \sin \theta_i + \psi_2^0 \cdot \cos \theta_i + \psi_3^0 \cdot \sin 2\theta_i + \psi_4^0 \cdot \cos 2\theta_i \quad (11)$$

### 3. 제안하는 레졸버 위치오차 보상 알고리즘

기존의 오차 보상 기법으로 오차 테이블에 의한 보상은 단순하면서도 가장 기본적인 오차 보상 방법으로 다른 정밀 위치센서를 통하여 측정된 오차 정보를 ROM 테이블에 기록하여 놓았다가 측정된 위치정보에서 ROM 테이블에서 구한 오차정보를 차감하여 보정하는 방법이다[4]. ROM 테이블을 좀 더 발전시킨 방식으로 계산된 속도를 입력으로 하는 테이블을 추가하여 과도조건을 포함하여 위치오차를 보상하는 방식도 있지만 이 방법은 위치오차를 측정하는 별도의 작업을 필요로 하므로 하나의 단품에서 구한 오차정보로는 제품간의 편차를 고려하지 못한다.

다른 종류의 기존의 보상기법으로는 레졸버 위치오차 원인인 진폭 불평형, 직교오차 등을 레졸버 출력신호를 조절하여 보상하는 방법이 있다[7]. 불평형인 두 출력신호 중에서 진폭이 큰 편인 신호를 감쇄시켜 평형을 맞추거나 두 출력 신호를 가감산 등 연산처리하여 직교오차가 제거된 신호를 얻는 방법이다. 한편 단품간 편차에 대응할 수 있도록 반복최소 제곱법(Recursive Least Square, RLS)을 이용하여 위치오차를 보상하는 방식이 제안되었다[8]. 이 방법은 관측값이 무한히 반복될 때도 최소 연산량으로써 대응할 수 있어 실시간 처리에 적합한 방식이지만 수렴되기까지 지연시간이 발생하게 되고 수렴 전에는 위치오차 모델의 출력 값이 정확하지 않은 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 수렴시간을 개선하고 위치오차 보상의 정확도를 높이기 위해 칼만 필터(Kalman Filter)를 이용하여 레졸버 위치 오차를 보상하고자 한다.

그림 2는 제안하는 방식의 개념도이다. 본 논문의 방식은 측정된 위치정보로부터 위치오차 모델의 파라미터를 추정하여 변수의 크기를 구한다. 이 추정된 변수로부터 위치 오차를 구하게 되며 그림 2의 우측 상단에 표시된 것과 같이 추정된 위치 오차를 측정된 위치에서 차감하여 위치를 보정하게 된다. 각 블럭의 기능은 아래와 같다.

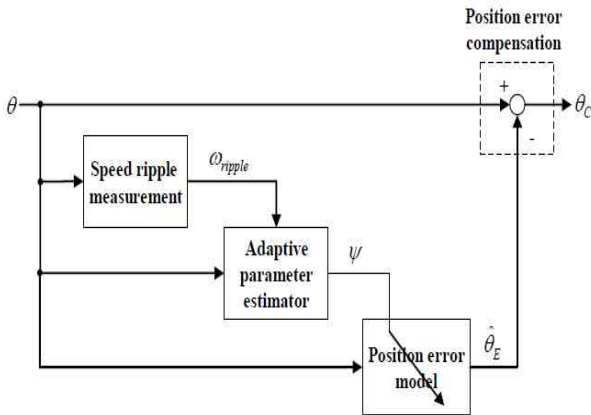


그림 2. 위치 오차 적응보상 개념도  
Fig. 2. Conceptual diagram of position error compensation scheme

### 3.1 속도리플 측정부

그림 3은 속도 리플 및 속도 관측부이다. LPF는 저역 통과필터(Low pass filter)이며, 1/Z는 한 샘플링 주기 지연을 의미한다. 위치오차가 포함된 위치정보를 미분하면 속도 리플이 관측되는데, 이 속도 리플을 측정하기 위하여 우선 위치오차의 영향이 배제된 이상적인 속도를 구한다. 이상 속도 ( $\omega$ )는 위치 오차가 없을 때의 속도라고 할 수 있다. 위치 정보를 미분하면 속도를 구할 수 있다. 그러나 실제 위치에는 일정 속도라고 하더라도 레졸버 위치 오차에서 기인하는 속도 리플을 가진다.

따라서 이상 속도 혹은 평균 속도를 구하기 위해서는 위치정보를 미분한 속도정보로부터 위치오차에 의해 발생하는 리플의 주파수 성분을 제거하여 얻을 수 있다. 그림 3을 통해 이상 속도를 구하는 과정은 다음과 같다. 우선, 측정 위치정보의 차분을 구한다. 이 때 RDC에서 출력되는 위치정보는  $2\pi$ 로 제한된 범위를 가지므로 불연속점 부근에서 차분 값에 오차가 발생할 수 있다. 이를 위하여 위치증분을  $2\pi$ 로 나누어 나머지를 취하는 나머지(modulo) 연산을 행한다.  $0\sim 2\pi$  구간에 존재하는 위치정보를 샘플링 주기( $T_s$ )로 나누어 속도 정보를 얻는다. 이후 위치 오차에 의한 속도 성분을 제거하도록 차단주파수가 설정된 저역통과필

터를 거쳐 리플 성분을 제거한 이상속도를 얻고, 미분 속도로부터 이상 속도를 차감하여 속도 리플 성분을 추출할 수 있다.

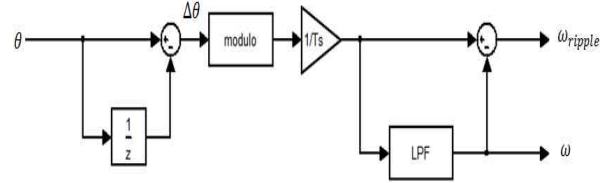


그림 3. 속도 리플 측정부  
Fig. 3. Speed ripple measurement part

### 3.2 파라미터 적응 추정기

앞서 서술한 것과 같이 위치오차는 위치 주기의 기본파와 2차 고조파로 구성되는데, 모델에서는 각 차수 성분의 크기와 위상차를 함께 고려하기 위하여 기본파와 2차 성분을 각각 정현항과 여현항으로 나누어 구성하였다.

$$\theta_E(i) = \psi_1^0 \cdot \sin\theta_i + \psi_2^0 \cdot \cos\theta_i + \psi_3^0 \cdot \sin 2\theta_i + \psi_4^0 \cdot \cos 2\theta_i \quad (12)$$

$\psi_1^0, \psi_2^0, \psi_3^0, \psi_4^0$ 은 모델 파라미터로서 각 성분의 크기이다. 위 첨자 0는 실제의 값을 나타낸다. 본 절에서 파라미터 추정에 사용하려고 하는 속도 리플 모델은 위치오차 모델식 (12)을 미분하여 식 (13)와 같이 구한다.

$$\omega_{ripple}(i) = \psi_1^0 \cdot \omega \cos\theta_i - \psi_2^0 \cdot \omega \sin\theta_i + \psi_3^0 \cdot 2\omega \cos 2\theta_i - \psi_4^0 \cdot 2\omega \sin 2\theta_i \quad (13)$$

제안하는 방식에서는 속도 리플 모델의 파라미터를 칼만 필터를 이용하여 추정한다. 칼만 필터는 잡음이 포함되어 있는 선형 역학계의 상태를 추적하는 재귀 필터로 실시간으로 하나의 시스템이 시간에 따른 변화를 적절하게 예측할 수 있도록 잡음으로부터 신호를 찾아내기 위해 사용된다. 다양한 모델에 적용 가능할 뿐만 아니라 트래킹 능력이 뛰어나며 칼만 필터 수식은 아래와 같다.

칼만 필터를 적용한 레졸버 위치 오차 보상기법

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1}, P_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (14)$$

$$K_k = P_k H^T (HP_k H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k(z_k - H\hat{x}_k)$$

$$P_k = P_k - K_k H P_k$$

여기서 측정값  $z_k$ 는  $\omega_{ripple}$  이고, 추정해야할 값  $\hat{x}_k$ 는  $[\psi_1^0 \ \psi_2^0 \ \psi_3^0 \ \psi_4^0]^T$ 이다. 시스템 모델은,

$$H = [\omega \cos \theta_i \quad -\omega \sin \theta_i \quad 2\omega \cos \theta_i \quad -2\omega \sin \theta_i] \quad (15)$$

로 설정한다. R과 Q는 잡음의 공분산 행렬로서 측정값의 반영 정도를 결정한다. R이 클수록 칼만 이득이 커져 외부 측정값의 영향을 덜 받게 되어 추정값의 변화가 줄어들므로 변화가 완만한 추정값을 얻게 되고, Q가 커질수록 오차 공분산 예측 값이 커져 추정값이 더 많이 반영되므로 추정값의 변화가 커진다.

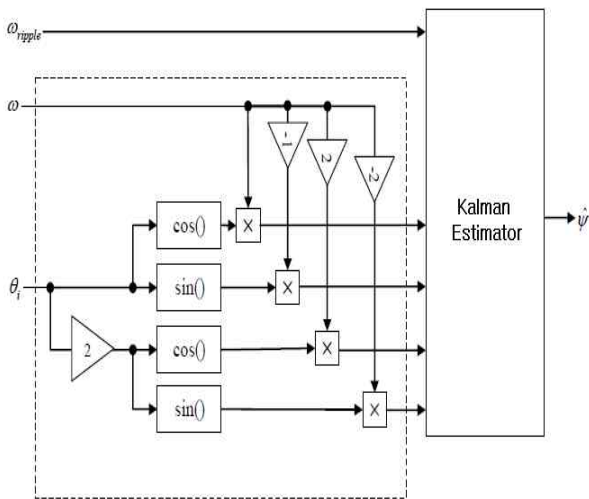


그림 4. 파라미터 적응 추정기  
Fig. 4. Parameters adaptation estimator

칼만 필터에 의한 파라미터 추정은 입력신호에 잡음이 포함되어 있는 경우에도 연산 수가 증가하면 추정값이 실제 값에 수렴하게 되는 경향이 있으므로 과도적 속도변동이 있더라도 파라미터 수렴이 보장된다.

### 3.3 위치오차 모델

칼만 필터에서 추정한 속도 리플 모델의 파라미터는 위치오차 모델의 파라미터와 동일하므로 이를 식 (15)의 위치오차 모델에 적용하여 위치오차의 추정 값을 산출한다.

$$\hat{\theta}_E(i) = \hat{\psi}_1 \cdot \sin \theta_i + \hat{\psi}_2 \cdot \cos \theta_i + \hat{\psi}_3 \cdot \sin 2\theta_i + \hat{\psi}_4 \cdot \cos 2\theta_i \quad (16)$$

## 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서 제안한 레졸버 위치오차 적응 보상의 타당성을 확인하기 위하여 MATLAB/Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 행하였다. 레졸버 위치오차는 앞서 언급한 것과 같이 기본파 성분과 2고조파로 설정하였다. 운전 조건으로는 전동기가 정속으로 회전되고 일정 부하가 인가되는 상황을 설정하여 정속 회전수는 450rpm, 고조파의 크기는  $\psi_2^0$  항을 15%(0.15),  $\psi_3^0$  를 4%(0.04)로 설정하였다. 샘플링 주파수는 10kHz이다.

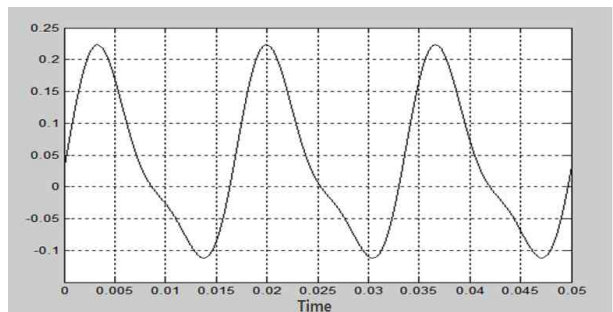


그림 5. 위치오차 파형(1rad/div.)  
Fig. 5. Waveform of position error(1rad/div.)

위 조건에서 시뮬레이션에 인가되는 위치오차의 파형은 그림 5와 같다. 정속으로 운전 시, 오차를 포함하지 않은 이상적인 레졸버 위치의 추정값은 0에서  $2\pi$ 까지 선형적으로 증가해야 하지만, 오차인 고조파를 포함하게 되면 위치 변동이 생긴다. 다음 그림 6은 이상적인 레졸버 위치와 오차를 포함한 추정값을 나타내었다.

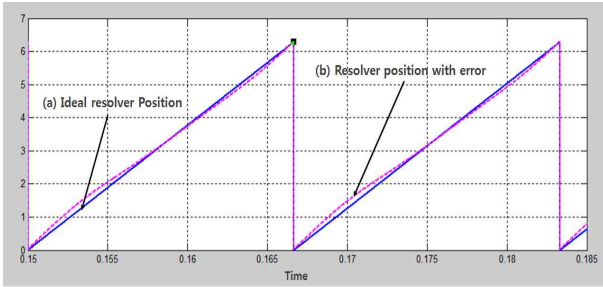


그림 6. (a) 이상적인 레졸버 위치, (b) 오차를 포함한 레졸버 위치(1rad/div)  
 Fig. 6. (a) Ideal resolver position, (b) resolver position with error(1rad/div)

그림 7의 위로부터 첫 번째 그래프는 위치정보를 차분하여 구한 속도이다. 그림에서와 같이 측정된 속도 정보는 위치정보에 포함된 주기적 위치오차가 미분된 속도 리플을 포함한다. 세 번째 그래프는 미분하여 얻은 속도를 2차 버터워스 필터를 통과시켜 얻은 이상 속도의 파형이다. 산출 과정에서 저역통과 필터를 사용하므로 초기에 과도적인 오차가 나타난다. 두 번째 그래프에 측정 속도에서 이상속도를 차감하여 얻어낸 속도 리플을 나타내었다.

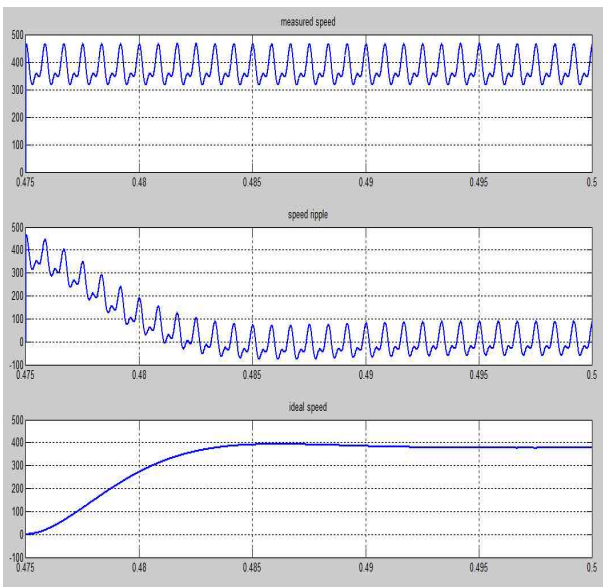


그림 7. 위치오차가 반영된 측정 속도, 속도리플과 이상속도  
 Fig. 7. Motor Speed with position error, speed ripple and ideal speed from top to bottom

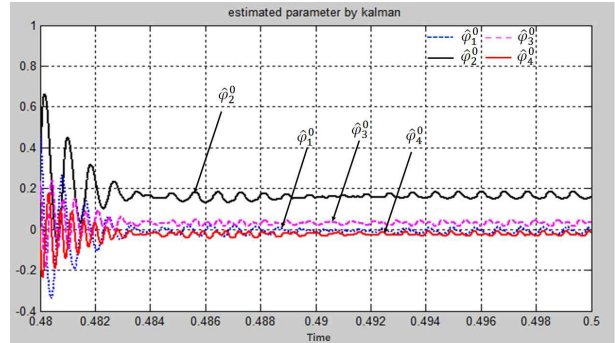


그림 8. 위치오차 모델 파라미터의 추정  
 Fig. 8. Estimation of parameters of a position error model

그림 8은 제안하는 방식에 의해 칼만 필터를 적용하여 추정한 속도리플 모델의 파라미터이다. 값이 5ms 이내에 수렴하는 것을 알 수 있으며, 수렴한 값이  $\hat{\psi}_2^0$ 는 0.15로  $\hat{\psi}_3^0$ 는 0.04로 수렴함을 알 수 있다.

그림 9는 제안한 기법을 적용했을 때와 하지 않았을 때의 위치 값을 나타낸다. 제안한 기법에 의해서 위치가 직선적으로 변하는 것을 볼 수 있어 제안한 방식의 타당성을 확인할 수 있다.

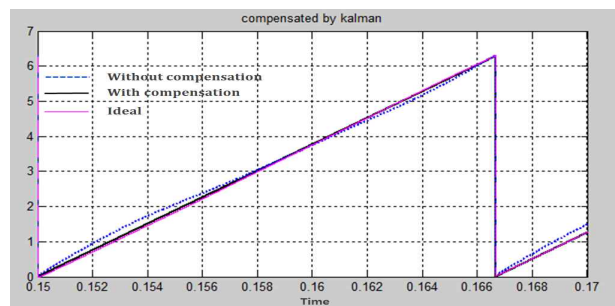


그림 9. 제안한 방식을 사용할 때와 사용하지 않았을 때의 위치값  
 Fig. 9. Waveform of positions with and without the proposed scheme

그림 10은 기존 방법인 RLS를 이용하여 위치오차를 보상했을 경우를 비교한 것이다. 그래프를 보았을 때 칼만 필터의 수렴 지점이 100ms 정도 빠르고, 수렴 후의 위치 오차의 리플도 더 작은 것을 확인할 수 있다. 즉 칼만 필터가 RLS보다 우수함을 알 수 있다. 이상의 시뮬레이션 결과에서 본 논문이 제시한 레졸버 위치



오차의 적응보상이 설계 의도대로 동작함을 확인할 수 있었다.

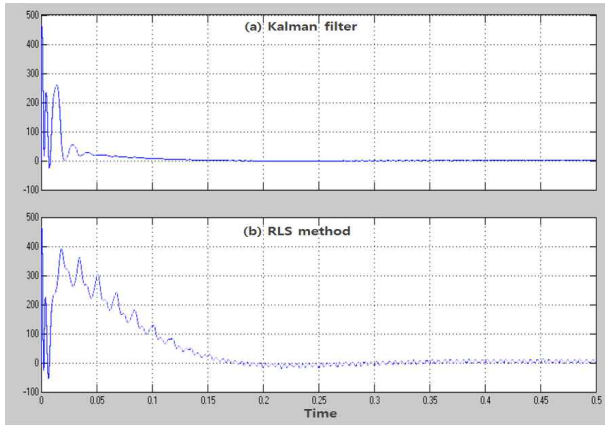


그림 10. 속도리플 측정-추정간 오차(a. Kalman filter, b. RLS 기법)

Fig. 10. Comparison of speed ripple error by a) Kalman filter, and b) RLS method

## 5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 위치센서로 사용하는 레졸버의 위치오차를 순시적으로 보상하여 전동기의 고성능 제어를 가능하도록 하였다. 레졸버 고유의 위치오차 특성을 보상하기 위한 기존의 방법들은 단품간의 편차를 고려할 수 없거나, 수렴속도가 느린 단점을 가진다. 이를 극복하고자 본 논문에서는 위치오차를 모델식으로 정식화하고 모델 파라미터를 칼만 필터를 이용하여 순시적으로 추정하는 방법을 제시하였다. 시뮬레이션을 통하여 제시한 방법이 설계 의도대로 동작함을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 칼만 필터를 이용한 위치오차의 적응추정 방법을 적용함으로써 기존 방법들에 비해 보다 빠르고 정확한 위치오차의 보상이 가능함을 확인하였다.

## References

[1] P. Vas and M. Alakula, "Field-oriented control of saturated induction machine," IEEE Trans. on Energy Conv., vol. 5, no.1, pp. 218-224, 1990.  
 [2] Y. Ohshima and Y. Akiyama, "Servo sensors elements and application," Intertec Communications Inc., 1988.

[3] L. Hamefors, H.P. Nee, "A general algorithm for speed and position estimation of AC motors," IEEE Trans. on Indus. Electr., vol. 47, no. 1, pp. 77-83, Feb. 2000.  
 [4] A. Bunte and S. Beineke, "High-performance speed measurement by suppression of systematic resolver and encoder errors," IEEE Trans. on Indus. Electr., vol. 51, no. 1, pp. 49-53, Feb 2004.  
 [5] Y.H. Kwon, S.H. Hwang, J.M. Kim, and J.W. Ahn, "Compensation of amplitude imbalance of resolver signal for PMSM drives," Power Electr. and Motion Control Con., pp. 1827-1831, 2009.  
 [6] H.B. Lim, "Adaptive compensation of resolver position error for high-performance HEV motor control, Hanyang Univ., Ph. D thesis, 2010.  
 [7] D.C. Hanselman, "Techniques for improving resolver to digital conversion accuracy," IEEE Trans. on Indus. Electr., vol. 38, no.6, pp. 501-504, 1991.  
 [8] R. Hoseinnezhad, V. Hawthorn, A. Hadiashar, and P. Harding, "Calibration of resolver sensors in electro-mechanical braking systems a modified recursive weighted least-squares approach," IEEE Trans. on Indus. Electr., vol. 54, no. 2pp. 1052-1060, 2007.

## ◆ 저자소개 ◆



**안지혜** (安地蕙)

1988년 1월 6일생. 2011년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자통신공학과 석사수료.



**안형진** (安亨眞)

1986년 10월 4일생. 2012년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업. 2012~2013년 LG Electronics Inc. (평택) 연구원. 현재 홍익대학교 대학원 전자통신공학과 석사과정 재학.



**박준열** (朴俊烈)

1950년 3월 23일생. 1987년 서울대학교 전자공학과 졸업(박사). 1980년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.