
무향 칼만 필터에 의한 영구자석 동기 전동기 센서리스 속도제어

문 철* · 권영안**

Sensorless speed control of Permanent Magnet Synchronous Motor
by Unscented Kalman filter.

Cheol Moon* · Young-Ahn Kwon**

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20104010100670)입니다.

요 약

영구자석 동기전동기는 높은 효율성과 우수한 토크 발생 및 벡터 제어 성능이 뛰어나 많은 산업 현장을 포함하여 광범위하게 활용되어 지고 있다. 정밀한 제어를 위해서는 회전자 속도 및 위치 정보를 필요로 하지만 속도 센서를 사용하면 안정성 및 환경의 영향에 신뢰도가 감소하는 단점이 있다. 센서리스 속도 제어 방식에서 측정된 값은 노이즈를 포함하게 되며 이는 정밀한 속도 제어에서 성능을 저해하는 방식으로 나타난다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도 제어를 하기 위해 고정자 전류 및 속도와 회전자 위치를 무향 칼만 필터를 이용하여 추정하였으며 시뮬레이션을 통해 기존의 방식인 확장 칼만 필터와 상호 비교하였다. 제안된 모델의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 동일한 모델을 통한 실험에서 속도 오차 정확성을 검증하였다.

ABSTRACT

In order to implement good control of the permanent magnet synchronous motor(PMSM), the exact speed and rotor position information is needed. Recently, many studies have performed about sensorless speed control of the PMSM. This paper proposed sensorless speed controls of PMSM by using the Unscented Kalman Filter(UKF). The UKF is designed to eliminate the noise and get to the accuracy value and deals with the estimation of the speed and the rotor position of PMSM. Simulation and experiment have been performed for the verification of the proposed algorithm.

키워드

영구자석 동기전동기, 센서리스 속도 제어, 무향 칼만 필터, 무향 변환, 잡음

Key word

PMSM, Sensorless speed control, UKF, UT, noise

* 준회원 : 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정

** 정회원 : 부산대학교 전자전기공학과부 교수 (교신저자, yakwon@pusan.ac.kr)

접수일자 : 2011. 11. 30

심사완료일자 : 2012. 04. 15

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.5.967>

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

센서리스 속도 제어 방식에서 측정된 값은 노이즈를 포함하게 되며 이는 정밀한 속도 제어에서 성능을 저해하는 방식으로 나타난다. 전동기의 비선형성을 고려하여 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)는 다른 방식에 비해 알고리즘의 복잡성, 또는 많은 계산량이 요구되나 그러한 단점에도 불구하고 백색 가우시안 노이즈(White Gaussian Noise)를 가진 비선형 시스템에서 노이즈 제거에 탁월하고 외란에 강인한 성능을 보이는 회귀(recursive) 알고리즘이다.[1~5]

허나 자코비안(Jacobian)을 이용한 선형화 과정에 의해 불안정해지는 문제가 야기되는 경향이 있고 대부분이 1차 미분에서만 성능을 증명되었다는 단점이 있다. 이러한 EKF의 문제를 개선하고자 제시된 무향 칼만 필터(Unsecented Kalman Filter, UKF)는 무향변환(Unsecented Transform, UT)을 통해 선형화 과정을 생략함으로써 이러한 불안정성 오차 문제를 방지하고 있다. [6]

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도 제어의 신뢰성을 확보하기 위한 새로운 기법을 제안하였다. 센서리스 속도 제어에 필요한 속도와 회전자 위치를 UKF를 이용하여 추정하였다. 전동기의 기계적 정수들은 전기계의 제 정수들에 비해 알기 어렵고 급격하게 변동하는 경향이 있으므로 상태 변수들은 전기계에 관련된 전류와 전압으로 구성된다. 제안된 모델의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 동일한 모델을 통한 실험에서 속도 오차 정확성을 검증하였다.

II. 영구자석 동기 전동기의 수학적 모델링

전동기 해석에서 3상 전압방정식보다 2상으로 표현하는 것이 간단하고 제어하기 용이하다. 2상 고정자 기준 좌표계($\alpha_s - \beta_s$) 전압 방정식과 2상 회전자 기준 좌표계($dr - qr$) 축의 전압방정식은 다음과 같다.

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{di_{\alpha s}}{dt} - \Psi_m \omega_r \sin\theta_r \quad (1)$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + \Psi_m \omega_r \cos\theta_r \quad (2)$$

$$v_{dr} = R_s i_{dr} + L_s \frac{di_{dr}}{dt} - L_s i_{qr} \omega_r \quad (3)$$

$$v_{qr} = R_s i_{qr} + L_s \frac{di_{qr}}{dt} + L_s i_{dr} \omega_r + \Psi_m \omega_r \quad (4)$$

III. 무향 칼만 필터

UKF는 비선형 시스템에서 기존의 EKF의 문제로 인식되는 선형화 과정을 UT를 통해 생략함으로써, 오차를 방지할 수 있다. 또한 UT에서 샘플을 추출하는 방식으로 시그마 포인트(Sigma Point)와 가중치(Weight)를 사용하여 많은 수의 샘플(Sample)을 가지고 평균(Mean)과 공분산(Covariance)을 구하는 대신 정교한 가중치를 설정하여 일정 수의 샘플만으로도 가능하게 한다.

평균이 x_m 이고 공분산이 P_x 인 상태벡터의 크기가 n 인 정규분포를 따르는 상태변수 x 일 때, 비선형 함수 $f(x)$ 의 평균과 공분산을 구하는 것이 목적이다.

$$x_1 = \hat{x} \quad W_1 = \frac{\lambda}{n + \lambda} \quad (5)$$

$$x_{i+1} = \hat{x} + (\sqrt{nP})_i \quad W_{i+1} = \frac{\lambda}{n + \lambda}$$

$$x_{i+n+1} = \hat{x} - (\sqrt{nP})_i \quad W_{i+n+1} = \frac{1}{2(n + \lambda)}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

시그마 포인트 x_{k-1} 및 가중치 W_k 를 선정한 후 예측 단계에서 추정값 $\hat{x}_{k+1|k}$ 과 오차 공분산 $P_{k+1|k}$ 예측을 수행하며 측정 모델이 $y_k = h(x_k) + \rho$ 일 때 측정값 $\hat{y}_{k+1|k}$ 과 오차 공분산 $P_{y, k+1|k}$ 은 아래와 같이 예측된다. 교정 단계에서는 칼만 이득 계산에 필요한 상호 공분산 P_{xy} 구하고 아래와 같이 칼만 이득 K_k 을 구한 후 추정값 \hat{x}_k 계산과 재귀하기 위한 오차 공분산 P_k 계산한다.

$$\hat{x}_{k+1|k} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i f(x_{i, k|k-1}) \quad (6)$$

$$P_{k+1|k} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i (f(x_{i, k|k-1}) - \hat{x}_{k+1|k}) (f(x_{i, k|k-1}) - \hat{x}_{k+1|k})^T + Q \quad (7)$$

$$\hat{y}_{k+1|k} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i h(x_{i, k|k-1}) \quad (8)$$

$$P_{y, k+1|k} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i (h(x_{i, k|k-1}) - \hat{y}_{k+1|k}) (h(x_{i, k|k-1}) - \hat{y}_{k+1|k})^T + R \quad (9)$$

$$P_{xy} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i (f(xchi_{i,kk-1}) - \hat{x}_{k+1k}) (h(x_{i,kk-1}) - \hat{y}_{k+1k})^T \quad (10)$$

$$K_k = P_{xy} P_y^{-1} \quad (11)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{kk-1} + K_k (y_k - \hat{y}_k) \quad (12)$$

$$P_k = P_{kk-1} - K_k P_y K_k^T \quad (13)$$

IV. 무향 칼만 필터에 의한 영구자석 동기 전동기의 센서리스 속도 제어

노이즈를 고려한 비선형 시스템의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$x_{k+1} = f(x_k) + Bv + r \quad (14)$$

$$y_k = h(x_k) + \rho$$

여기서 r 는 시스템 잡음, ρ 는 측정 잡음이며 평균이 0인 백색 가우시안 분포를 가진다. 각각의 노이즈에 대한 공분산 행렬은 $cov(r) = E[\gamma \cdot \gamma^T] = Q$, $cov(\rho) = E[\rho \cdot \rho^T] = R$ 이다. x 는 $[i_\alpha \ i_\beta \ w_r \ \theta_r]^T$, 입력 벡터 v 는 $[v_\alpha \ v_\beta]^T$ 출력 벡터 y 는 $[i_\alpha \ i_\beta]$ 이다. 따라서 상태 변수로 $i_\alpha, i_\beta, w_r, \theta_r$ 를 취하면, 영구자석 동기 전동기의 비선형 시스템은 다음과 같이 표시된다.

$$x = [i_\alpha \ i_\beta \ w_r \ \theta_r]^T \quad v = [v_\alpha \ v_\beta]^T \quad y = [i_\alpha \ i_\beta]^T$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} i_\alpha + \frac{\lambda}{L_s} w_r \sin(\theta_r) \\ -\frac{R_s}{L_s} i_\beta - \frac{\lambda}{L_s} w_r \cos(\theta_r) \\ 0 \\ w_r \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

이상 UKF를 이용한 센서리스 속도제어 시뮬레이션 및 실험을 수행을 위한 시스템의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 먼저 전동기 상전류의 정보를 획득하고, 지령 전압 및 전동기 파라미터를 사용하여 UKF를 이용한 관측기에서 전류 및 속도 그리고 위치를 추정한다. 속도 제어기와 전류 제어기에서는 관측된 값과 지령값을 PI제어를 통해 다음 샘플링 구간에서의 지령 전압을 결정하여 인버터의 스위칭 신호를 결정한다.

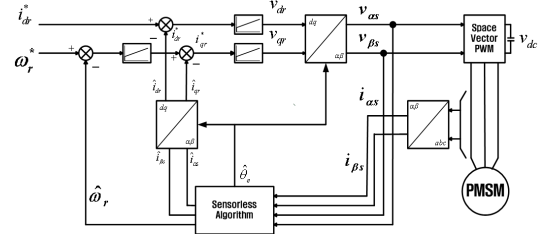


그림 1. 전체시스템 구성도
Fig. 1 Configuration of overall system

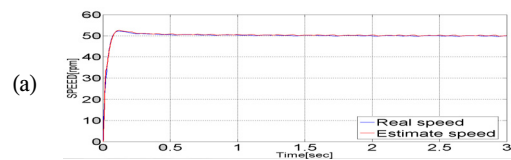
V. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 UKF 방식을 이용한 센서리스 속도제어방식의 타당성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 수행하였다. 본 논문에서 사용된 영구자석 동기전동기는 3상 원통형이며 8극 750W 전동기이다. 전류 샘플링 주기는 400usec이며 속도 샘플링 주기는 2ms이다.

시뮬레이션에서 사용된 프로세스 잡음 공분산 Q 와 측정 잡음 공분산 R 은 반복적 실험을 통해 다음과 같이 가정한다. 반복적 수행을 통해 Q_{33} 값이 커지면 속도 추정 오차가 작아지는 반면 노이즈 제거 효과가 낮고 작아지면 그 반대가 되므로 적절한 값 선정이 중요하다.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.004 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

그림 2(a),(b) 및 (c)는 동기 전동기의 센서리스 속도 제어시 UKF의 추정 성능을 검토하기 위해 무부하에서 속도 지령치를 각각 50rpm, 200rpm 및 500rpm으로 한 경우의 속도응답을 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과, 양호한 속도 응답을 보여주고 있다.



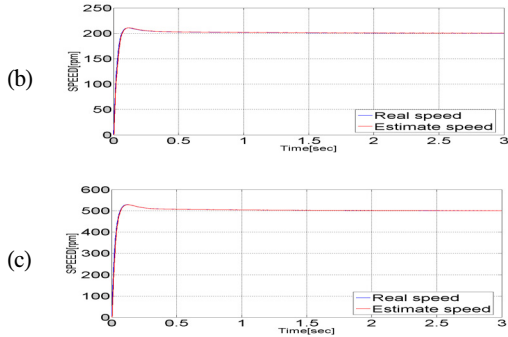


그림 2. 속도 응답 시뮬레이션
 (a) 50rpm (b) 200rpm (c) 500rpm
 Fig. 2 Speed response in the speed commands
 (a) 50rpm (b) 200rpm (c) 500rpm

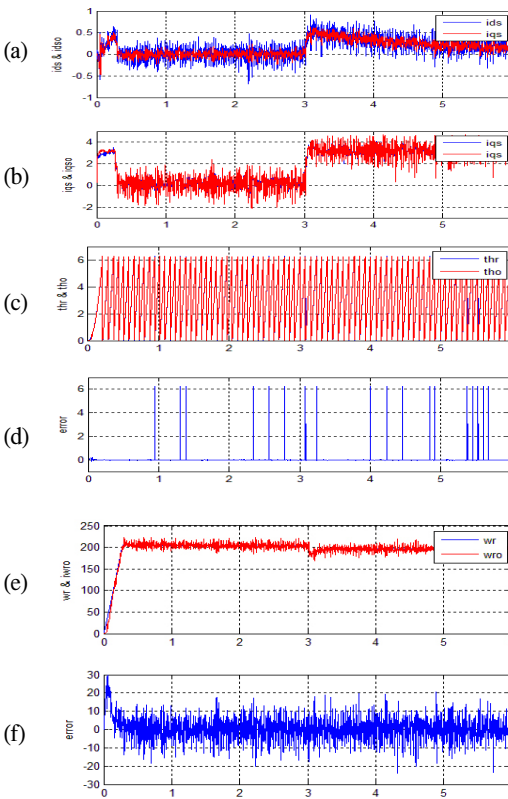


그림 3. EKF에서 노이즈를 포함하는 부하변동에 의한 속도 응답. (a) 실제 직축 전류 · 추정된 직축 전류 (b) 실제 횡축 전류 · 추정된 횡축 전류 (c) 실제 회전각 · 추정된 회전각 (d) 회전각 오차 (e) 실제 속도 · 추정된 속도 (f) 속도 오차

Fig. 3 Speed response in EKF with noise injection when the load is changed. (a) Real d-axis current · Estimated d-axis current (b) Real q-axis current · Estimated q-axis current (c) Real rotor angle · Estimated rotor angle (d) angle error (e) Real speed · Estimated speed (f) speed error

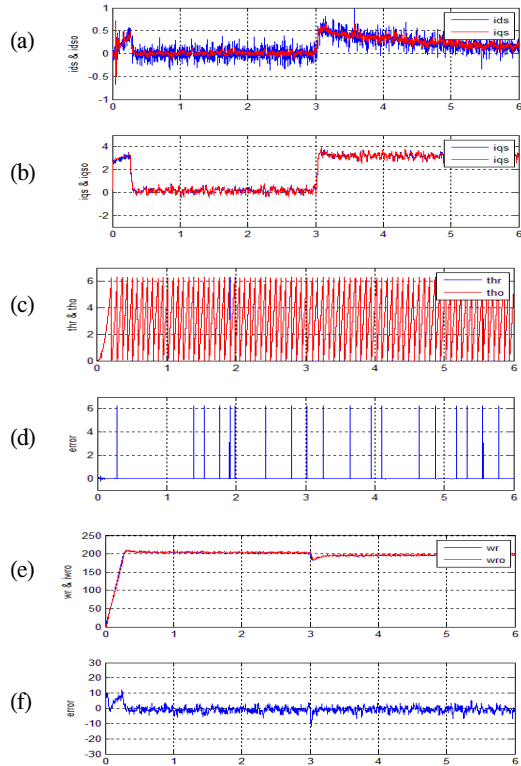


그림 4. UKF에서 노이즈를 포함하는 부하변동에 의한 속도 응답. (a) 실제 직축 전류 · 추정된 직축 전류 (b) 실제 횡축 전류 · 추정된 횡축 전류 (c) 실제 회전각 · 추정된 회전각 (d) 회전각 오차 (e) 실제 속도 · 추정된 속도 (f) 속도 오차

Fig. 4 Speed response in UKF with noise injection when the load is changed. (a) Real d-axis current · Estimated d-axis current (b) Real q-axis current · Estimated q-axis current (c) Real rotor angle · Estimated rotor angle (d) angle error (e) Real speed · Estimated speed (f) speed error

그림 3은 EKF에서 그림 4는 UKF에서 실험적 경험을 통해 평균이 0이고 표준편차는 0.1을 갖는 백색 가우시안 노이즈를 전류센서에서 발생한다고 가정하고 주입한 상호 비교 파형이다. 200rpm의 속도 응답에서 정상상

태 운전일 때 부하 변동에 의한 속도 응답을 보여 주고 있다. 정상상태에서 2.0Nm의 부하가 인가된 후 속도가 순간적으로 감소한 수 일정 시간이 지나면 원래의 지령치를 추정하는 것을 알 수 있다. 그림 3.(a),(b) 와 그림 4.(a),(b)를 상호 비교하면 UKF에서 전류의 노이즈 제거가 확연히 뛰어난 것을 알 수 있으며 그림 4.(e),(f)와 그림 5.(e),(f)를 상호 비교하면 UKF에서 속도 오차가 배 이상으로 줄어든 것을 확인 할 수 있다.

VI. 실험결과 및 검토

본 논문에서 센서리스 속도 제어 방식의 실험적 검증 을 위하여 실험 장치를 구성하였다. SanRex DF60BA80 3 상 브리지 다이오드로 구성된 정류부, 직류링크 커패시 터, 인버터, 게이트드라이브, 제어용 PC, 12bit A/D, 공간 벡터 PWM을 수행하기 위한 카운터/타이머로 구성되어 있다. 인버터는 3상 풀 브리지 형태로 취하는 전력회로 로 구성되어 있으며, 공간전압벡터 PWM을 구현하기 위 해 16비트 카운터/타이머 3개를 사용하였다. 제어용 PC 는 마이크로프로세서(Intel80586) 시스템을 사용하였다. 적용된 영구자석 동기 전동기의 사양은 시뮬레이션에 서와 같다.

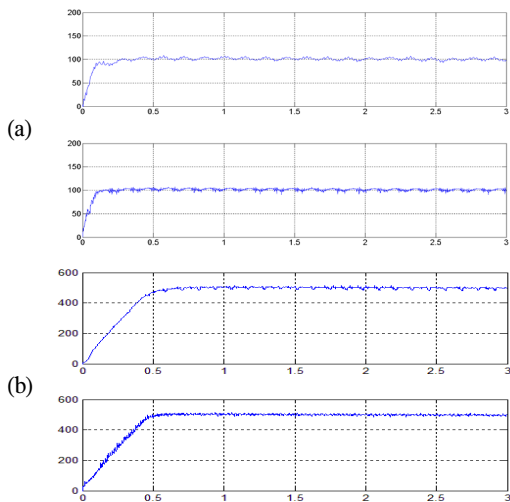


그림 5. 속도 응답 시뮬레이션 (a) 50rpm (b) 500rpm
Fig. 5 Speed response in the speed commands (a) 100rpm (b) 500rpm

그림 5(a),(b)는 추정 성능 검토를 위해 무부하에서 지령속도를 각각 100rpm, 500rpm으로 한 경우의 실험 파형을 나타내었으며 양호한 결과를 도출하였다.

그림 6은 지령속도가 200rpm으로 한 경우의 실제속도 및 추정 속도 그리고 실제전류와 추정 전류 비교 실험 파형을 나타내었으며 노이즈가 적절히 제거됨을 알 수 있다.

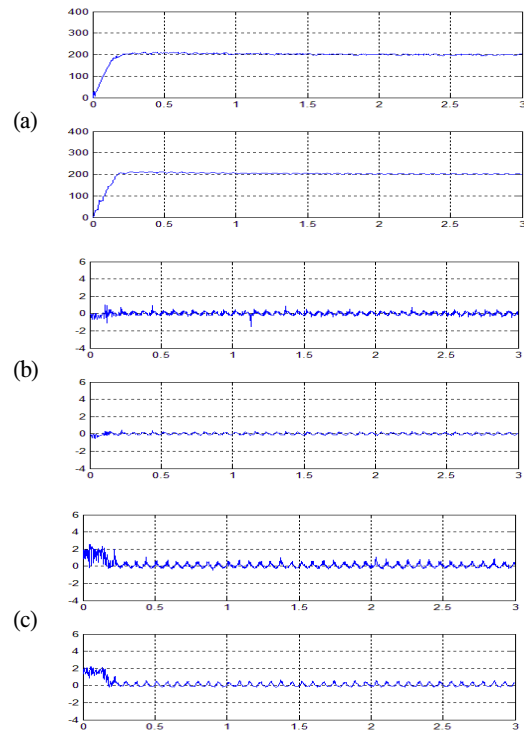


그림 6. 지령속도 200rpm에서 속도 및 전류 비교 (a) 실제 속도 · 추정된 속도 (b) 실제 직축 전류 · 추정된 직축 전류 (c) 실제 횡축 전류 · 추정된 횡축 전류
Fig. 6 Compared to speed and current in the case of speed command 200 rpm. (a) Real speed · Estimated speed (b) Real d-axis current · Estimated d-axis current (c) Real q-axis current · Estimated q-axis current

그림 7은 부하변동에 의한 속도 응답을 보여준다. 일정 시간 후 지령치와 같은 정상 속도로 회복하는 것을 알 수 있다.

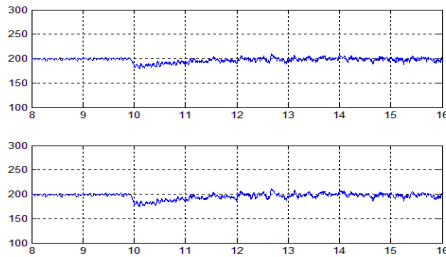


그림 7. 부하변동에 의한 속도 응답
Fig. 7 Speed response when the load is changed

VII. 결 론

본 논문에서 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 방식으로 UKF를 이용한 방식을 제안하였다. UKF는 측정전류를 이용하여 속도와 회전자 위치를 추정하였고 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과 양호한 속도 응답으로 타당성을 입증 할 수 있었다. 또한 시뮬레이션에서 기존의 방식인 EKF와 상호 비교하여 노이즈 제거에 용이하며 양호한 속도 추정을 증명하였다. UKF는 폭 넓은 속도 영역에서 노이즈의 영향을 고려한 경우에 속도 응답에서 오차가 적은 양호한 응답특성을 보였다. 또한 빠른 수렴 특성으로 인해 만족스러운 결과를 얻은 장점이 있는 반면 저속에서의 추정은 기존의 방식과 마찬가지로 부정확한 값을 발생시켰다. 향후 연구 과제로는 강인할 수 있는 알고리즘 개발과 저속에서의 정밀한 속도 추정 등의 개선이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20104010100670)입니다.

참고문헌

[1] Editor by K. Rajashekara A. Kawamura, and Matsuse, Sensorless Control of AC Motor Drives, IEEE Press, 1996.

[2] J.Holtz, "State of the art of controlled AC drives without speed sensors.", Int. J. of Elect. vol.80. no.2, pp249-263. 1996.
 [3] I. Bolda, "Control issues in adjustable speed drives." IEEE Ind. Elec. Magazine, vol.2, no.3, pp32-50. Sept 2008.
 [4] Z. Zedong, L. Yongdong, Fadel, M, X. Xi, "A Rotor Speed and Load Torque Observer for PMSM Based on Extended Kalman Filter" Industrial Technology, ICIT 2006. IEEE International Conference, pp. 233-238, Dec. 2006.
 [5] R. Dhaouadi, N. Mohan and L. Norum, "Design and implementation of an extended Kalman filter for the state estimation of a permanentmagnet synchronous motor," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 6, no. 3, July 1991, pp. 491 - 497.
 [6] Julier, S.J. Uhlmann, J.K.; Durrant-Whyte, H.F., "A new approach for filtering nonlinear systems", Proceedings of the American Control Conference, pp 1628-1632, Seattle WA, YSA, 1995.

저자소개

문 철(Cheol Moon)



2010 부산대학교 전자전기공학부 졸업.
 현재 부산대학교 동 대학원 전자전기공학과 석사과정.

※관심분야: 전력전자

권영안(Young-Ahn Kwon)



1978 서울대 전기공학과 졸업.
 1986 동 대학원 전기공학과 박사 졸업.
 1991 스위스 취리히 공대 객원교수.

현재 부산대학교 전자전기공학부 교수.

※관심분야: 전력전자