

확장칼만필터를 이용한 SRM의 위치센서 없는 제어

김호성*, 양이우*, 신재화**, 김영석*
 *인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부, **인천전문대

The Control of SRM using the Extended Kalman Filter without a Position Sensor

Ho-Sung Kim, Jae-Wha Shin, Young-Seok Kim
 Inha Univ, Incheon College

Abstract - The rotor position information is needed to control the speed of SRM(Switched Reluctance Motor). The information of the rotor position have been generally acquired by using the encoder or the resolver. Speed sensors, however, occasionally malfunction under the hostile environment such as EMI, dust, high temperature and humidity, etc. There have been many efforts to drive the motor without speed sensors. In this paper, the EKF(Extended Kalman Filter) theory is proposed to drive the SRM without speed sensors. Proposed method keeps a robust speed estimation performance against the input noise because it includes a noise model of measuring noise within the system. The validity of the proposed method has been examined by simulations.

본 논문에서는 8/6의 SRM에 있어서 외란과 시스템으로 유입하는 잡음에 견디는 확장칼만필터를 이용한 속도 및 위치 센서없는 SRM의 제어방법을 제안한다. SRM의 전류모델과 전동기의 운동방정식을 기초로하여 확장칼만필터를 도입함으로써 외란변동에 견디고, 측정 잡음과 시스템 잡음에 대한 추정 오차의 분산을 최소화하도록 하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 상태방정식

그림 1 (a)는 한상(A상)을 여자(Excitation)시키는 구동시스템이고 (b)는 등가모델을 나타낸다. 여기서 E_a 는 속도기전력을 의미한다.

1. 서 론

SRM은 고정자와 회전자가 이중돌극(Double Salient Pole)구조로 간단하고 견고하다. 또한, 손실에 있어서도 고정자 권선에서만 동손이 발생하므로 유도전동기에 비하여 효율이 높고, 넓은 속도 범위에서 일정한 토크를 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나, SRM은 기동 및 구동을 위해서 회전자의 위치정보가 필수적이다. 이 정보를 얻기 위해 엔코더(Encoder)나 레졸버(Resolver)와 같은 센서가 사용되어 왔다. 이러한 센서는 고가이며, 열악한 환경하에서는 잡음의 혼입 및 신뢰성의 문제를 야기시키고 있다. 이러한 이유로, 속도 및 위치 센서없는 제어가 활발하게 연구되어지고 있다.

속도 및 위치 센서없이 회전자 위치를 알아내는 방법으로 직접적인 방법과 간접적인 방법이 연구되고 있다. 직접적인 방법 가운데에서 전류 상승률에 의한 인덕턴스 추정법은 실험을 통하여 위치에 대한 인덕턴스 프로파일을 구하고, 시스템 적용시 전류 상승률에 의한 인덕턴스를 추정하는 방법으로, 저속에서는 가능하나 고속영역에서는 샘플링 시간 동안에 취득할 수 있는 전류의 제약으로 구현이 불가능한 단점이 있다. [1]~[2]

간접적인 방법은 추정된 전류를 사용하여 상호인덕턴스 및 자속을 추정하고, 그를 통하여 회전자 위치를 판별하는 방법 [3]~[4]과, 관측기를 이용하여 속도 및 위치를 추정하는 방법 [5]이 제안되고 있다. 상호인덕턴스 및 자속의 추정은 직접적인 방법과 동일하게 상호인덕턴스 및 자속의 사전 정보를 기초로, 전류를 측정하여 전류에 따른 자속 및 상호 인덕턴스를 계산하고, 회전자 위치를 추정하는 방법으로, 저속의 영역에서는 가능하나, 고속의 경우는 역기전력의 영향으로 불가능한 단점을 갖고 있다. 관측기를 이용하는 방법은 SRM의 선형화된 수학적 모델로부터 회전자 위치 및 속도를 추정하는 방법으로 선형화된 방정식을 사용하고, 파라미터 변동을 고려하지 않고 있으므로, 강인성의 저하의 문제점이 있다.

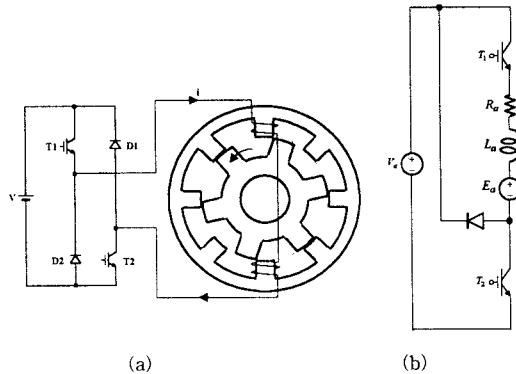


그림 1. SRM의 구동시스템 및 한상분 등가모델

상간의 상호인덕턴스를 무시했을 때 한 상에서의 전압 방정식과 발생하는 토크는 식(1), 식(2)와 같으며, 식(3)은 운동방정식을 나타낸다.

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + \omega \frac{dL}{d\theta} i \tag{1}$$

$$T = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} i^2 \tag{2}$$

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_l \tag{3}$$

단, V : 전원전압, R : 권선저항, L : 인덕턴스
 i : 전류, ω : 속도, θ : 회전자의 위치
 T : 토크, T_l : 부하 토크

2.2 확장칼만필터

칼만필터는 반복적인 최적 추정기(Recursive Optimal Estimator)로서 수학적인 모델은 상태공간 개념(State Space Concept)에 근거를 두고 있으며 잡음이 섞인

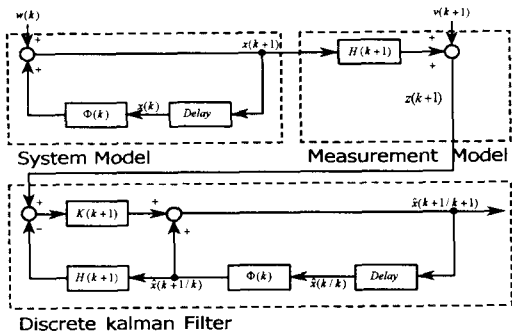


그림 2. 시스템 모델과 이산형 칼만필터

입력데이터를 반복적으로 수행하기 때문에 온라인 디지털 처리가 가능하다. 따라서 칼만필터를 모델링하기 위해서는 시스템에 대한 초기정보와 시스템 및 측정 잡음을 정의하기 위한 잡음모델, 시스템의 동적 상태에 대한 모델링이 필요하다. 그림 2 에서와 같이 이산형 칼만필터는 1사이클 이전에 저장된 데이터에 의해 계산되는 신호의 초기 추정치와 오차의 공분산(Error Covariance)을 가지고 시작하여 실시간에서 측정할 수 있는 측정치를 이용하여 필터 이전의 추정된 값들을 새롭게 조절해 간다.

이산형 칼만필터 시스템 및 측정치의 동적모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X(k+1) = \Phi(k)X(k) + w(k) \quad (4)$$

$$Z(k) = H(k)X(k) + v(k) \quad (5)$$

여기서, $X(k)$ 는 $n \times 1$ 시스템 상태벡터, $\Phi(k)$ 는 $n \times n$ 상태전이행렬(State Transition Matrix), $w(k)$ 는 기저 공분산 구성을 갖는 벡터 무상관 시퀀스(Uncorrelated Sequence)로 가정된 $n \times 1$ 시스템 잡음, $Z(k)$ 는 $m \times 1$ 측정치, $H(k)$ 는 측정치와 상태벡터사이의 잡음이 없는 이상적인 $m \times n$ 행렬이고, $v(k)$ 는 기저 공분산 구성을 갖는 벡터 무상관 시퀀스로 가정된 $m \times 1$ 측정 잡음이다.

시스템 잡음과 측정 잡음으로 정의된 $w(k)$, $v(k)$ 공분산 행렬은 다음식을 만족한다.

$$E[w_i] = 0 \quad (6)$$

$$E[v_i] = 0 \quad (7)$$

$$E[w_i w_j^T] = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ Q \delta_{ij}, & i = j \end{cases} \quad (8)$$

$$E[v_i v_j^T] = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ R \delta_{ij}, & i = j \end{cases} \quad (9)$$

$$E[w_i w_j^T] = 0 \quad (10)$$

$$E[(X(0) - \hat{X}(0))(X(0) - \hat{X}(0))^T] = P(0) \quad (11)$$

여기서,

$P(0)$ = 추정오차공분산의 초기값

$Q \delta_{ij}$ = 시스템 오차공분산의 초기값

$R \delta_{ij}$ = 측정 오차공분산의 초기값

δ_{ij} = kronecker delta

시스템의 동적모델과 위에서 정의된 공분산 행렬들의 정의로부터 다음의 이산형 칼만필터 알고리즘을 이용하여 상태변수들을 추정할 수 있다.

2.2.1 상태방정식의 갱신

$$\hat{X} = \hat{X}(k/k-1) + K(k)[Z(k) - H(k)\hat{X}(k/k-1)] \quad (12)$$

2.2.2 추정오차 공분산의 갱신

$$P(k/k) = [I - K(k)H(k)]P(k/k-1)[I - K(k)H(k)]^T + K(k)R_kK(k)^T \quad (13)$$

2.2.3 칼만이득

$$K(k) = P(k/k-1)H(k)^T [H(k)P(k/k-1)H(k)^T + R_k]^{-1} \quad (14)$$

2.2.4 오차의 공분산 및 불편향 추정자

$$P(k+1/k) = \Phi(k)P(k/k)\Phi(k)^T + Q_k \quad (15)$$

$$\hat{X}(k+1/k) = \Phi(k)\hat{X}(k/k) \quad (16)$$

2.3 SRM에 적용된 확장칼만필터

SRM의 상태방정식은 각 상전류 및 회전속도를 상태변수로 고려했을 때 전압방정식 식(1) 및 운동방정식 식(3)으로부터 표현되어질 수 있다. 이 연속시간 미분형태의 상태방정식을 이산형 칼만필터에 적용하기 위하여 테일러 근사화에 의해 이산화된 상태방정식으로 변경시킨다. 그리고, 전체적인 상태방정식은 회전자 속도로 인하여 비선형이 되므로 상태방정식을 추정하고자 하는 상태변수로 편미분하여 선형화과정을 거치는 확장칼만필터 이론이 적용된다. 따라서 비선형 상태공간 모델식은 다음과 같다.

$$\xi(k+1) = f(\xi(k), u(k)) + w(k) \quad (17)$$

$$z(k) = h(\xi(k)) + v(k) \quad (18)$$

여기서,

$$\xi(k) = [\xi_1(k) \ \xi_2(k) \ \xi_3(k) \ \xi_4(k) \ \xi_5(k)]^T$$

$$= [i_a(k) \ i_b(k) \ i_c(k) \ i_d(k) \ \omega(k)]^T$$

$$w(k) = [w_1(k) \ w_2(k) \ w_3(k) \ w_4(k) \ w_5(k)]^T$$

$$v(k) = [v_1(k) \ v_2(k) \ v_3(k) \ v_4(k)]^T$$

$$z_1(k) = i_a(k) + v_1(k)$$

$$z_2(k) = i_b(k) + v_2(k)$$

$$z_3(k) = i_c(k) + v_3(k)$$

$$z_4(k) = i_d(k) + v_4(k)$$

비선형 상태공간 모델식을 추정하고자 하는 상태변수 $\xi_i (i=1, \dots, 5)$ 로 편미분하여 선형화하며, 이를 이용하여 이산형 상태행렬식으로 표현할 수 있다. 따라서 확장칼만필터 알고리즘을 반복적으로 되풀이하므로서 구하고자 하는 회전자속도를 추정할 수 있으며, 이 속도를 적분함으로써 회전자의 위치를 추정할 수 있다. 전체적인 시스템구성은 그림 3과 같이 구성된다.

2.3 모의 실험

모의실험에 적용된 SRM의 사양은 표 1과 같다. 제어기의 성능을 평가하기 위하여 1000rpm 인가하였을 때와 1500rpm으로 가속하였을 때의 속도응답특성을 살펴보았다.

표1. SRM의 파라메타

고정자 극수	8	회전자극수	24.6°
회전자 극수	6	고정자극수	22.8°
한상분저항	1.25[Ω]	정격토크	0.8[Nm] (240V, 5A, 4000rpm)

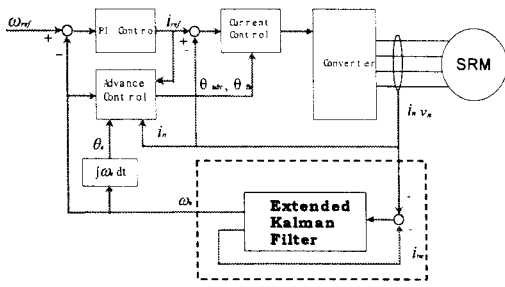


그림 3. 전체 시스템 구성

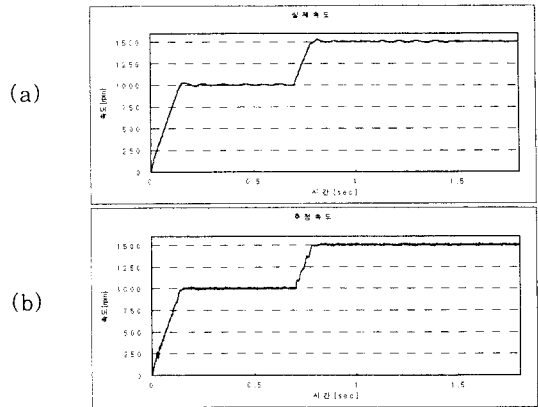


그림 5. 1000-1500rpm 가변시 제한한 추정기의 속도 응답특성
(a) 실제속도 (b) 추정속도

이내의 오차를 가지며 추정하고 있다.

그림 5는 1000rpm에서 1500rpm으로 가변속을 실시하였을 경우의 실제속도 및 추정속도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 가변속시에도 제한한 추정기의 추정상태가 양호함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서 외란변동에 견실하고, 측정잡음과 시스템 잡음에 견실한 확장칼만필터를 이용한 위치 및 속도센서 없는 SRM의 제어방법을 제안하였다. 각 상전류 및 속도를 상태변수로 고려하였으며, 비선형의 상태방정식에 확장칼만필터를 도입하여 위치 및 속도를 추정하였다. 그리고 모의 실험을 통하여 제안한 확장칼만필터를 이용한 위치 및 속도 센서 없는 SRM의 제어방법이 측정잡음이나 시스템 잡음에 대하여 견실함을 알 수 있었으며, 속도 가변속시에도 추정 오차를 최소화하여 속도 및 위치를 양호하게 추정함을 알 수 있었다. 추후 실험을 통하여 본 시스템의 타당성을 증명한다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소 과제(97-065)로 수행되었음을 알립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.K.Panda, and G.Amaratunga, "Switched Reluctance Motor Drive Without Direct Rotor Position Sensing", IEEE IAS Annual Meeting, pp525-530, 1990
- [2] P.P.Acarnley, R.J.Hill and C.W.Hooper, "Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Motors by Monitoring of Current Waveforms", IEEE Trans. IE, Vol. IE-32, No.3, pp215 - 222, 1985
- [3] J.P.Lyons and S.R.MacMinn, "Flux/Current Methods for SRM Rotor Position Estimation", IEEE Ann. Mtg., pp482 - 487, 1991
- [4] M.Ehsani, I.Hsain, "Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutually Induced Voltages", IEEE Trans. Industrial Application, vol.30, no.3, pp665 - 672, May/June 1994.
- [5] C.Elmas and H.Zelaya-De La Parra, "Position Sensorless Operation of a Switched Reluctance Drive Based on Observer", European Power Electronics Association, pp82 - 87, 1993
- [6] 김상욱, "속도센서없는 유도전동기의 견실한 백터제어 시스템에 관한 연구", 박사학위논문, 인하대학교, pp62-74, 1998

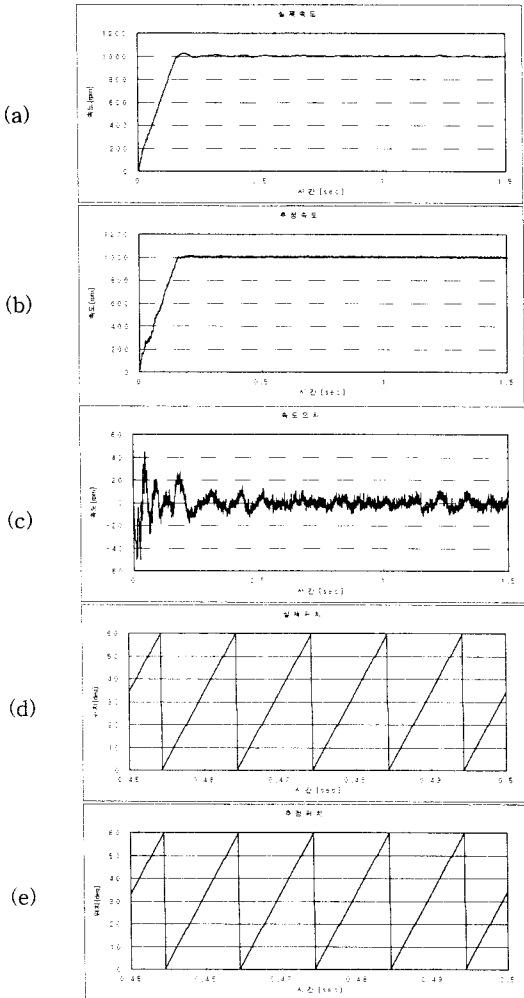


그림 4. 1000rpm인가시 제한한 추정기의 속도응답특성
(a) 실제속도 (b) 추정속도 (c) 속도오차
(d) 실제위치 (e) 추정위치

그림 4는 50%의 부하(0.4[Nm])와 랜덤잡음을 측정 잡음으로 가하였을 때 1000 rpm 속도 지령치에 대한 실제속도, 추정속도, 추정오차, 실제위치 및 추정위치를 나타낸다. 정상상태에서는 속도오차가 최대 10rpm (1%)으로 제한한 확장칼만필터가 측정 잡음이나 외란에 대하여 속도추정을 정확하게 할 수 있음을 확인하였다. 또한 정상상태에서는 추정위치가 실제위치에 대해 2°