

슬라이딩 모드 관측기와 적응 필터를 이용한 SPMSM 기계 파라미터 추정

김형우¹, 최준영[†]

SPMSM Mechanical Parameter Estimation Using Sliding-Mode Observer and Adaptive Filter

Hyoung-Woo Kim¹ and Joon-Young Choi[†]

Abstract

We propose a mechanical parameter estimation algorithm for surface-mounted permanent magnet synchronous motors (SPMSMs) using a sliding-mode observer (SMO) and an adaptive filter. The SMO estimates system disturbances in real time, which contain the information on mechanical parameters. A desirable feature that distinguishes the proposed estimation algorithm from other existing mechanical parameter estimators is that the adaptive filter estimates electromagnetic torque to improve the estimation performance. Moreover, the SMO acts as a low-pass filter to suppress the chattering effect, which enables the smooth output signals of the SMO. We verify the mechanical parameter estimation performance for SPMSM by conducting extensive experiments for the proposed algorithm.

Key words: Adaptive filter algorithm, Parameter estimation, SPMSM(Surface-mounted Permanent Synchronous Motor), SMO(Sliding Mode Observer)

1. 서 론

최근 영구자석 전동기(PMSM)는 높은 전력 밀도 및 토크, 고효율, 간단한 구조로 인한 장점으로 산업용 서보 드라이버, 전기 자동차, 풍력 발전 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 모터의 파라미터는 오류 진단, 고장자/회전자 온도 감시뿐만 아니라 고성능 제어를 위해 사용되는데 전체 시스템의 관성모멘트, 점성 마찰 계수, 부하 토크를 포함하는 기계 파라미터들은 높은 정밀도의 속도 제어 성능을 얻기 위한 핵심 역할을 한다. 만약 이러한 파라미터들을 정확히 추정할 수 있다면 PMSM 제어기 이득 조정이 명확하게 이루어질 수 있어 PMSM 전체 시스템의 제어 성능을 향상시키기 위한 최적의 제어 기법을 설계하기 용이해진다^[1].

다양한 기계 파라미터 추정 기법에 관한 연구가 제안되었으며 이는 크게 파라미터 적응법^[2], recursive least square(RLS) 알고리즘^[3], model reference adaptive system (MRAS)^[4], 관측기 기반 기법^[5], 확장 칼만 필터(EKF, extended Kalman filter)^[6]의 다섯 가지로 분류된다.

MRAS 기반 추정 기법은 설계가 간편하고 구현이 용이하여 다양한 어플리케이션에 적용되고 있으나, 실시간으로 부하 토크를 추정할 수 없다는 단점이 있다. 파라미터 적응법의 경우 설계 과정이 복잡하여 구현이 까다롭고, 적응 범칙에 대한 이득에 추정 성능이 민감하게 반응한다는 단점이 있다.

확장칼만필터를 이용한 추정알고리즘은 기계 파라미터를 하나의 시스템 변수로 취급하여 추정 값으로 간주하게 되고, RLS 알고리즘의 경우 반복적 계산 후 수렴하는 특정값을 추정치로 간주한다. 이러한 알고리즘을 이용한 방법은 실제 PMSM 제어 시스템의 기계 파라미터 추정에 많이 적용되고 있으나, 추정과정에 상대적으로 긴 시간을 요구하게 되고 특정 기준 속도 값에 의한 반복 동작이 요구된다^[7].

관측기 기반의 접근 방법들은 상기 언급된 방법들에 비해 설계와 구현이 상대적으로 간편하다. 이중 외란성

Paper number: TKPE-2019-24-1-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jyc@pusan.ac.kr, Dept. of Electronics Engineering, Pusan National Univ.
Tel: +82-51-510-2490 Fax: +82-51-515-5190

¹ Dept. of Electronics Engineering, Pusan National Univ.
Manuscript received Dec. 20, 2018; revised Dec. 27, 2018;
accepted Jan. 2, 2019

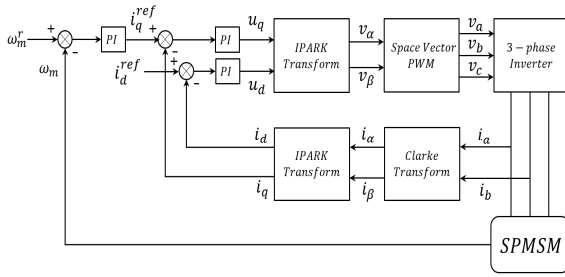


Fig. 1. Structure of SPMSM control system.

분을 이용해 파라미터를 관측하는 방법은 점성마찰 계수와 회전자 관성, 부하오차를 일종의 외란으로 간주하여 추정하는 방법^[8]이며 높은 정확도로 파라미터를 추정할 수 있으나 강인성이 취약하다.

이에 비해, 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 방법은 파라미터 변화와 같은 불확실성 요소에 보다 강인한 측면으로 LuGer 모델을 이용한 슬라이딩 모드 관측기 설계 방법^[9], 기계 파라미터의 추정 정확도를 높이기 위한 이차 슬라이딩 모드 관측기^[10] 설계 방법이 제안되었다. 그러나, 추가적으로 위상 지연과 진폭 변조를 발생시키는 저역통과필터가 채터링 현상 극복을 위해 필수적으로 요구된다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 추정 대상 파라미터의 오차를 포함하는 외란을 확장된 하나의 시스템으로 간주하여 관측기의 출력이 저역통과필터를 통과한 형태가 되도록 하는 방법^[11]이 제안되었으나, 별도로 요구되는 속도와 토크의 추정치가 고정된 회전자 쇄교 자속 공칭값에 의존한다는 단점이 있고 결과적으로 추정 대상이 되는 외란의 확장된 시스템은 파라미터 오차 뿐 아니라 토크 오차 성분을 포함하게 된다는 단점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 이를 해결하기 위해 먼저, 빠른 수렴 속도를 가지고 있지만 많은 계산량이 요구되는 RLS 알고리즘과 간단한 구조에 낮은 복잡성을 갖는 LMS 알고리즘을 혼합한 형태의 적응필터를 이용하여 회전자 쇄교 자속을 추정한다. 기계 파라미터의 직접적인 추정을 위한 관측기의 계산 속도보다 빠르게 회전자 쇄교 자속을 추정하여 시스템에 적용함으로써, 토크-속도 동적 모델의 외란 성분에 파라미터 오차 외의 성분을 제거하여 얻어진 새로운 외란변수를 확장하여 슬라이딩 모드 관측기를 설계한다. 이를 통해 채터링 현상이 없는 관측기 출력을 이용하여 보다 정확한 기계 파라미터 추정을 도모할 수 있다. 제안하는 방법의 성능을 검증하기 위해 SPMSM을 이용한 실험을 수행하였다.

2. SPMSM d-q 모델

그림 1은 SPMSM(Surface-Mounted Permanent Synchronous Motor)의 일반적인 벡터 제어 블록 다이어그램이다. 속도 제어와 전류 제어는 종래의 PI 제어를 이용하며, 3상

인버터는 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)을 이용하여 제어한다. 자기포화에 의한 영향, 모터의 구조적 비대칭성, 철손과 와전류손 등의 영향이 없다고 가정할 경우, SPMSM의 전자기 토크가 식 (1)과 같이 표현되어 속도-토크 관계식은 식 (2)와 같고, 연속시간 전압 전류 d-q 모델은 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

$$T_e = 1.5p_p\psi i_q \quad (1)$$

$$T_e = J\dot{\omega} + B\omega + T_l \quad (2)$$

$$v_d = Ri_d - p_p\omega Li_q + Li_d \quad (3)$$

$$u_q = Ri_q + p_p\omega Li_d + p_p\omega\psi + Li_q \quad (4)$$

이때, T_e 는 모터의 전자기 토크($N \cdot m$), p_p 는 극쌍의 수, ψ 는 회전자 쇄교 자속, ω 는 각속도(rad/s), J 는 관성($kg \cdot m^2$), B 는 점성마찰계수, T_l 은 부하토크($N \cdot m$), u_d 와 u_q 는 d-q 축 전압을 i_d 와 i_q 는 d-q축 전류 값을 나타내며 R 과 L 은 고정자 저항과 인덕턴스 값을 나타낸다.

3. SPMSM 기계 파라미터 추정

3.1 관측기 기반 파라미터 추정 기법의 문제점

SPMSM 모터의 토크, 점성 마찰 계수, 관성, 부하토크의 공칭값을 \hat{T}_e , \hat{B} , \hat{J} , \hat{T}_l 이라고 할 경우 속도와 토크의 역학식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{J}\dot{\omega} = \hat{T}_e - \hat{B}\omega + \hat{T}_l + e' \quad (5)$$

이때, 실제 토크 값인 T_e , 공칭값 \hat{T}_e , 오차 ΔT_e 는 회전자 쇄교 자속의 공칭값 $\hat{\psi}$ 과 오차 $\Delta\psi$ 에 의해 식 (6)과 같이 표현된다.

$$T_e = \hat{T}_e + \Delta T_e = 1.5p_p\hat{\psi}i_q + 1.5p_p\Delta\psi i_q \quad (6)$$

또한, e' 는 식 (7)과 같이 표현되는 점성 마찰 계수와 관성 그리고 부하토크 파라미터 오차 변수 ΔJ , ΔB , ΔT_l 에 의해 식 (8)과 같이 정의된다.

$$J = \hat{J} + \Delta J, \quad B = \hat{B} + \Delta B, \quad T_l = \hat{T}_l + \Delta T_l \quad (7)$$

$$e' = 1.5p_p\Delta\psi i_q - \Delta J\dot{\omega} - \Delta B\omega + \Delta T_l \quad (8)$$

기존의 외란 관측기^[8], 슬라이딩 모드 관측기^[10]기반의 파라미터 추정 기법에서는 회전자 쇄교 자속의 공칭값이 실제값과 같다는 가정을 통해 식 (8)의 우변의 첫 번째 항을 무시한다. 이 경우 관성, 점성 마찰 계수, 부하토크 오차 추정 결과가 실시간으로 변화하는 회전자 쇄교 자속 오차에 의한 전자기 토크 오차 성분을 포함하게 된다.

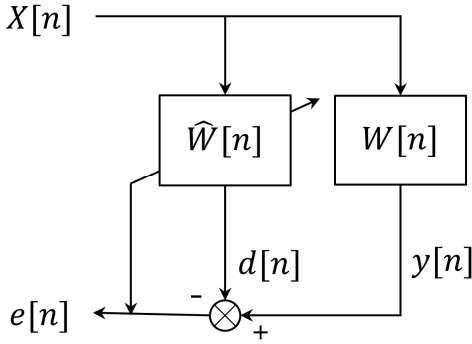


Fig. 2. Structure of adaptive filter.

또한, 토크 계수를 이용한 속도의 추정치와 실제 속도 간의 차가 만들어내는 슬라이딩 평면을 이용한 슬라이딩 모드 관측 기법들에서는 회전자 쇄교 자속 변화에 따른 속도의 추정 값의 변화가 반영되지 않아 불필요한 슬라이딩 모드 이득을 요구하게 되는 결과를 초래한다.

3.2 적응 필터를 이용한 회전자 쇄교 자속 추정

본 논문에서는 슬라이딩 모드 관측기의 계산 주기 보다 빠른 속도로 회전자 쇄교자속을 추정하기 위해서 계산이 간편한 LMS 알고리즘과 수렴속도가 빠른 RMS 알고리즘을 혼합하여 그림 2와 같은 형태의 적응 필터를 설계하여 회전자 쇄교 자속을 추정한다.

T_s 의 샘플링 시간을 갖는 이산 시간에서의 회전자 쇄교 자속 모델은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$-\omega T_s \psi = L(i_q[n+1] - i_q[n]) - T_s u_q[n] + T_s L_s \omega[n] i_d[n] \quad (9)$$

구하고자 하는 회전자 쇄교 자속을 $W[n]$ 이라고 하고 모델이 알려지지 않은 시스템으로 간주하되, 입력신호 $X[n]$ 을 $-\omega T_s$ 라고 정의할 경우 식 (9)는 아래와 같이 표현된다.

$$X^T[n+1]W[n+1] = y[n+1] = L(i_q[n+1] - i_q[n]) - T_s u_q[n] + T_s L_s \omega[n] i_d[n] \quad (10)$$

이 경우 $y[n]$ 와 $W[n]$ 을 추정된 시스템 $\widehat{W}[n]$ 의 출력 $d[n]$ 간의 차는 $e[n]$ 이 되며 식 (11)과 같다.

$$e[n+1] = y[n+1] - X^T[n+1]\widehat{W}[n] \quad (11)$$

RLS 알고리즘을 기반으로 1차 적응 필터를 설계하면 아래와 같다.

$$\widehat{W}[n+1] = \widehat{W}[n] + e[n+1]g[n+1] \quad (12)$$

이때, $g[n]$ 은 식 (13)과 같이 도출된다.

$$g[n+1] = \gamma X[n+1] \{ \eta + X^T[n+1]X[n+1] \}^{-1} \quad (13)$$

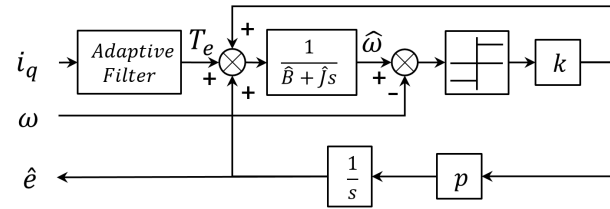


Fig. 3. Structure of sliding-mode observer.

설계한 적응 필터를 이용하여 회전자 쇄교 자속을 추정할 때 고정자 인덕턴스 L_s 와 고정자 전압 u_q 는 공칭 값을 이용하게 된다. 이 때, L_s 와 u_q 의 부정확성에 의한 추정 오차는 관측기의 슬라이딩 모드 입력과 전향 보상으로 제거된다.

상기 적응 필터를 이용할 경우 별도로 모터를 특정 동작 상태로 고정하지 않고 실시간으로 회전자 자속 값을 추정할 수 있고, 이를 통해 추정된 회전자 쇄교 자속 값을 이용하여 본 논문에서는 슬라이딩 모드 관측기를 설계하고 기계 파라미터를 추정한다.

3.3 슬라이딩 모드 관측기 설계

그림 3은 기계 파라미터를 추정하기 위한 슬라이딩 모드 관측기의 구조를 나타낸다. 토크 성분 전류인 q 축 전류와 적응 필터를 이용해 추정한 회전자 쇄교 자속 값을 이용하여 임의로 설정한 점성 마찰 계수와 관성으로 모델링된 모터의 속도 $\widehat{\omega}$ 를 추정한다.

실제 속도 ω 와 임의의 파라미터를 가지는 모델의 속도 $\widehat{\omega}$ 의 차가 슬라이딩 모드 평면 S 가 된다. 그림 3에 도시된 파라미터 중 k 는 음의 값을 갖는 이득이 되고, p 는 슬라이딩 평면에 도달하였을 때, 저역 통과 필터의 차단 주파수가 되어 슬라이딩 모드 관측기 출력 \widehat{e} 에서 발생하는 채터링 현상을 억제할 수 있도록 한다.

앞 절에서 설계한 적응 필터를 이용하여 회전자 쇄교 자속을 실시간으로 추정할 경우 식 (5)는 아래와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{\widehat{\omega}} = T_e - \widehat{B}\omega + \widehat{T}_l + e \quad (14)$$

이때, 기계 파라미터 오차 e 는 식 (15)와 같다.

$$e = -\Delta \dot{\omega} - \Delta B\omega + \Delta T_l \quad (15)$$

식 (14)와 식 (15)를 바탕으로 기계 파라미터를 추정하기 위한 슬라이딩 모드 관측기는 아래와 같이 설계할 수 있으며, 출력 \widehat{e} 는 파라미터 오차를 포함한다.

$$\dot{\widehat{\omega}} = T_e - \widehat{B}\widehat{\omega} + \widehat{e} + k \cdot \text{sgn}(S) \quad (16)$$

$$\dot{\widehat{e}} = p \cdot k \cdot \text{sgn}(S) \quad (17)$$

TABLE I
CONTROL MOTOR SPECIFICATION(EMJ-08-APB22)

Parameter	Value
Rated power	750 [W]
Rated speed	3000 [RPM]
Stator resistance	1 [Ohm]
Stator inductance	8.25 [mH]
Rotor flux linkage	0.102 [Wb]
Pole pairs	4

TABLE II
LOAD MOTOR SPECIFICATION(MDME152GCH)

Parameter	Value
Rated power	1.5 [kW]
Rated speed	2000 [RPM]
Rated current	9.4 [A(rms)]
Rated torque	7.16 [N · m]
Inertia	0.000799 [kgm ²]

$$\hat{e} = -\Delta \hat{J}\dot{\omega} - \Delta \hat{B}\omega + \Delta \hat{T}_l \quad (18)$$

슬라이딩 모드가 발생하여 평면에 도달했을 때, 식 (16)과 (17)에 의해 \hat{e} 는 식 (19)와 같이 차단 주파수 p 를 가지는 저역통과필터를 통과하는 형태가 되어 슬라이딩 모드에서 발생하는 채터링 현상을 억제할 수 있다.

$$\hat{e} = \frac{p}{s+p} \cdot e \quad (19)$$

4. 실험 및 파라미터 추정

본 논문에서 제안하는 적응필터와 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 기계 파라미터 추정 기법의 성능을 검증하기 위해 실험을 진행 한다. 실험에 사용한 제어 측 모터는 ESTUN社 EMJ-080-APB22를 이며, TMS320F28035 DSP 기반의 제어 보드와 별도의 모터 드라이브를 이용하였다. 제안한 파라미터 추정기법을 수행하기 위한 소프트웨어는 TI社 PC 기반 통합 개발환경인 CCS(Code Composer Studio) V7.4.0를 이용하여 구현하였다.

부하 측 모터로 Panasonic社 MDME152GCH를 이용하였고 서보드라이버는 MDDHT5540을 이용하였다. 부하 측 모터를 제어하기 위해 Panasonic社에서 제공하는 PANATERM 프로그램을 이용하여 1 Nm의 토크를 유지하도록 하였다. 실험에 사용된 제어 및 부하 측 모터의 스펙은 표 1, 2와 같고 구성된 실험 환경은 그림 4와 같다.

SPMSM을 포함한 실험 대상 시스템의 파라미터는 표 3에 기술된 바와 같다. 회전자 쇄교 자속은 모터의 특성 표에 기술된 값을 인용하면 0.102 Wb이며, 점성 마찰 계수는 대략 0.001127에 근사하는 값을 가진다. 또한, 제

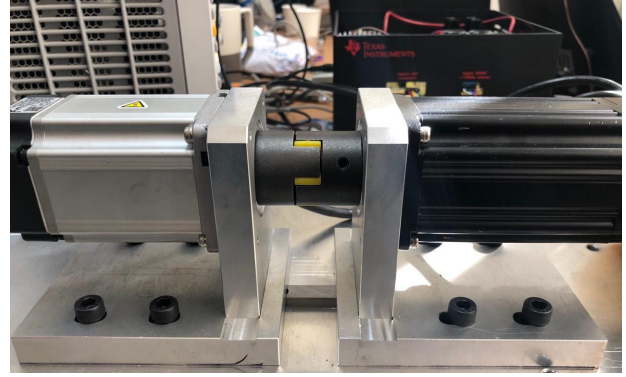


Fig. 4. Experiment Setup.

TABLE III
SYSTEM PARAMETERS

Parameter	Value
Rotor flux linkage	0.102 [Wb]
Viscous damping coefficient	0.001127
Inertia of control motor	0.000799 [kg · m ²]
Inertia of load motor	0.000135 [kg · m ²]
Inertia of coupler	0.000343 [kg · m ²]
Load torque	1.0 [N · m]
SMO Gain k, p	-2, 4

어 측 모터와 부하 측 모터, 커플러의 관성을 별도로 표시하였다. 부하 측 모터는 1.0 Nm의 일정 토크를 발생 시키도록 제어하였고, 구현한 소프트웨어 내 관측기의 이득 값은 k 가 -2, p 가 4의 값을 갖도록 설정하였다. 또한, 관측기의 동작을 모니터링 하기 위해 PC와 시리얼 통신을 이용하여 1 ms 마다 한번씩 관련 파라미터를 수집하여 데이터를 측정하였다.

그림 5는 본 논문에서 설계한 적응 필터를 이용한 회전자 쇄교 자속 추정 결과를 나타낸다. 그림 5의 첫 번째 파형은 모터를 임의로 1200 RPM으로 구동한 상태에서 적응 필터를 동작 시켰을 때의 속도를 나타낸다. 약간의 속도 제어 오차가 나타나는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 회전자 쇄교 자속 값의 업데이트 시 발생하는 토크 계수의 변화에 따라 속도제어에 영향을 미치는 상황을 나타낸다.

그림 5의 두 번째 파형은 모터의 특성이 기술되어 있는 문서에 기재된 회전자 쇄교 자속 값 ψ 과 적응 필터를 통해 추정된 회전자 쇄교 자속 값 $\hat{\psi}$ 를 나타낸다. 추정된 회전자 쇄교 자속 값은 0.095 Wb을 기준으로 진동하였으며 공칭값의 정확하다면 이는 0.005 Wb의 오차를 의미하며 5%의 오차에 해당한다.

적응 필터를 통해 획득한 회전자 쇄교 자속 값을 이용하여 슬라이딩 모드 관측기 동작을 위한 파라미터들을 조정된 후 동작 중인 슬라이딩 모드 관측기에 실시간으로 업데이트를 수행하도록 한다. 이 때, 그림 6은 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 점성 마찰 계수를 추

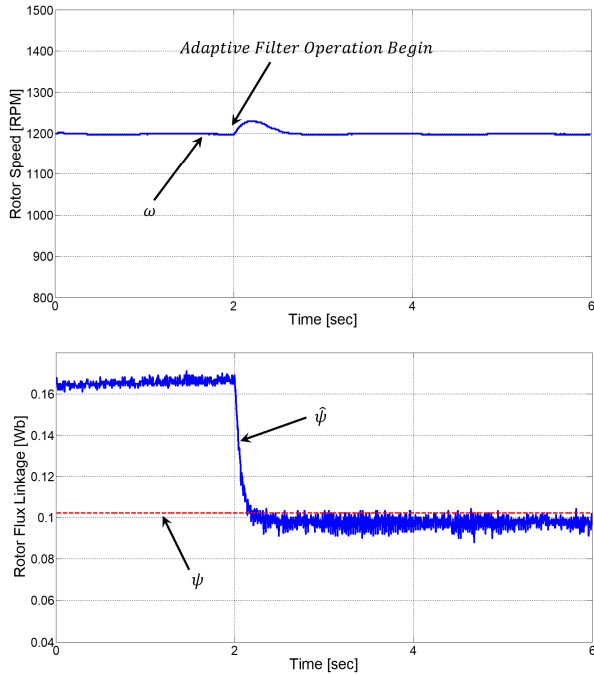


Fig. 5. Experimental results of rotor flux linkage estimation.

정한 결과 파형들을 나타낸다.

설계한 슬라이딩 모드 관측기를 통해 점성 마찰 계수를 추정하기 위해서는 두 번의 등속 운동이 필요하다. 모터의 속도가 ω_1, ω_2 일 때 도출되는 관측기 출력 \hat{e}_1, \hat{e}_2 를 식 (20)에 적용하면 점성 마찰 계수를 구할 수 있다.

$$B = \hat{B} + \Delta\hat{B} = \hat{B} - \frac{\hat{e}_2 - \hat{e}_1}{\omega_2 - \omega_1} \quad (20)$$

그림 6의 첫 번째 파형은 모터의 속도를 600 RPM으로 구동한 뒤 1500 RPM으로 구동하여 두 번의 정상상태 운전을 수행하는 상황을 나타낸다. 이 때 관측기의 출력은 그림 6의 두 번째 파형과 같이 도출되며 이를 통해 점성 마찰 계수를 추정한 결과는 세 번째 Fig.과 같다.

그림 6의 세 번째 파형의 점선은 점성 마찰 계수의 문서상 기재된 값을 의미하며, 동시에 이를 추정해나가는 관측기의 추정 동작을 관찰할 수 있다. 설계한 관측기의 출력과 식 (20)을 이용하여 도출된 점성 마찰 계수 추정치가 대략 0.00104의 값을 기준으로 진동하고 있어 추정해야 할 0.001127의 점성마찰계수 기준 약 10%에 해당하는 오차가 있음을 알 수 있다. 결과적으로 이 값을 업데이트 해줄 경우, ΔB 의 값은 0에 가까운 값으로 수렴하게 된다.

점성 마찰 계수를 추정하여 업데이트를 해줄 경우 관측기의 출력은 대부분 ΔJ 와 ΔT_l 에 의해 중속된다. 또한 여기서 일정한 가속 동작 상황을 연출하여 차를 계산할 경우 ΔT_l 의 영향을 무시할 수 있는데, 그림 7의 첫 번째 파형은 시스템의 관성을 구하기 위해 일정한 가속

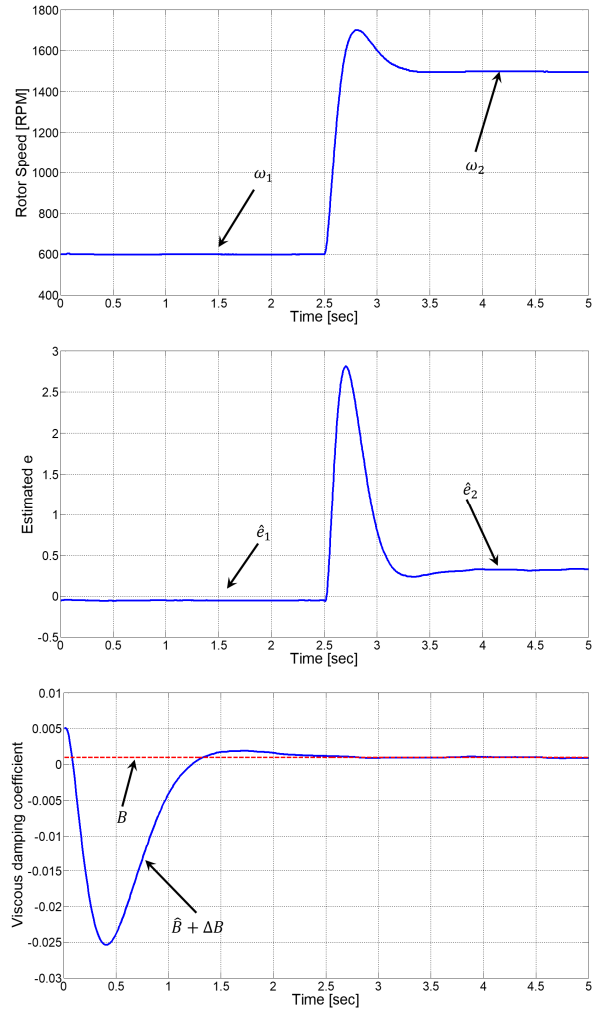


Fig. 6. Experimental results of viscous damping coefficient estimation.

운전을 두 번 연출한 상황을 나타낸다.

두 번의 등가속 $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2$ 을 하여 획득한 관측기 출력 \hat{e}_1, \hat{e}_2 을 식 (21)에 적용하면 관성을 추정할 수 있다.

$$J = \hat{J} + \Delta\hat{J} = \hat{J} - \frac{\hat{e}_2 - \hat{e}_1}{\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_1} \quad (21)$$

가속도가 일정한 값을 가지게 될 경우 관측기의 출력 값 또한 일정한 값을 가지게 되는데 그림 7의 두 번째 파형은 이러한 상황을 나타내는 파형이다. 따라서 가속도 값과 관측기 출력을 이용하여 식 (21)을 이용하여 관성을 계산할 수 있다.

그림 7의 세 번째 파형은 관성 추정의 결과를 나타내는 파형이다. 제어측 모터의 관성과 커플러, 그리고 부하 측 모터의 관성을 합하면 대략 0.001277 kgm²의 값을 얻을 수 있고, 그림 7의 세 번째 파형의 점선은 이 값을 표시한 것이다. 관측기 동작을 통해 결과적으로 ΔJ 가 0으로 수렴해 나가며 관성을 추정함을 알 수 있고 추정된 관성 값은 대략 0.00126 kgm²을 중심으로 진동

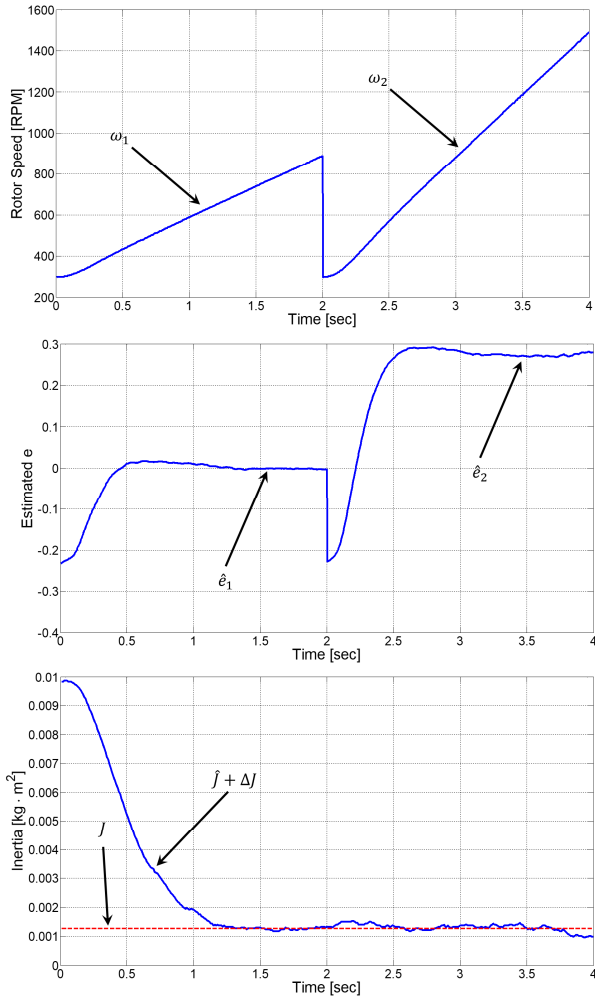


Fig. 7. Experimental results of inertia estimation.

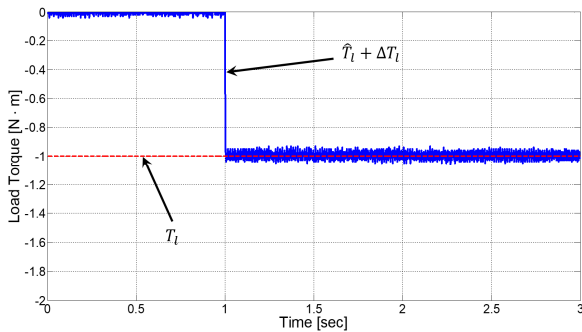


Fig. 8. Experimental results of load torque estimation.

하고 있어 오차가 약 7%에 해당함을 알 수 있다. 추정된 관성 값을 실시간으로 업데이트 해줌으로써 관측기의 출력 성분에서 관성 파라미터 오차에 의한 성분은 점차 사라지게 된다.

그 결과 최종적으로 관측기 출력은 부하토크 추정 오차 성분을 도출하게 되어 그림 8에 나타난 바와 같이 관성의 추정까지 마친 경우 최종적으로는 부하토크 성분을 출력함을 알 수 있다. 그림 8의 점선으로 표시된 것은 부하 모터를 이용하여 실제로 부하 측에 인가해준

토크를 나타내는데, 최종적으로 관측기 출력이 이 값을 추정하고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 표 1, 2, 3의 환경에서 진행된 실험에 의해 적응필터를 이용한 회전자 쇄교 자속 추정의 경우 5%, 추정된 쇄교 자속을 통해 토크와 속도 값을 업데이트한 슬라이딩 모드 관측기를 통한 점성 마찰 계수 추정의 경우 10%, 관성 추정의 경우 7%에 해당하는 오차를 갖는 기계 파라미터 추정 동작 성능을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 슬라이딩 모드 관측기와 적응필터를 이용하여 SPMSM의 기계 파라미터를 추정하는 기법을 제안하였다. 설계한 슬라이딩 모드 관측기는 적응필터를 이용하여 전자기 토크에 의한 오차가 제거된 형태의 외란을 확장한 모델을 기반으로 설계되어 관성, 점성마찰계수, 부하토크를 차례대로 추정할 수 있으며 이때 관측기의 출력은 조정가능한 차단주파수를 갖는 저역 통과 필터를 통과한 형태가 되어 채터링을 포함하지 않는다. 적응필터는 관측기 동작에 비해 대역폭이 높은 형태로 설계되어 관측 정밀도를 저하시키는 회전자 쇄교 자속 오차에 의한 외란을 제거할 수 있다. 제안한 기계 파라미터 추정 기법은 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

본 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2018R1D1A3B07043053)

References

- [1] K. Liu and Z. Q. Zhu, "Online estimation of rotor flux linkage and voltage source inverter nonlinearity in permanent magnet synchronous machine drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 1, pp. 418-427, Jan. 2014.
- [2] S. Kwak, U. C. Moon, and J. C. Park, "Predictive-control-based direct power control with an adaptive parameter identification technique for improved AFE performance," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 11, pp. 6178-6187, Nov. 2014.
- [3] T. H. Nguyen and D. C. Lee, "Deterioration monitoring of DC-link capacitors in AC machine drives by current injection," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 3, pp. 1126-1130, Mar. 2015.
- [4] F. C. Dezza, G. Foglia, M. F. Iacchetti, and R. Perini, "An MRAS observer for sensorless DFIM drives with direct estimation of the torque and flux rotor current

- components," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 5, pp. 2576-2584, May 2012.
- [5] H. Renaudineau, J. P. Martin, B. Nahid-Mobarakeh, and S. Pierfederici, "DC-DC converters dynamic modeling with state observer-based parameter estimation," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 6, pp. 3356-3363, Jun. 2015.
- [6] H. Aung, K. S. Low, and S. Ting Goh, "State-of-charge estimation of lithium-ion battery using square root spherical unscented Kalman filter (Sqrt-UKFST) in nanosatellite," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 9, pp. 4774-4783, Sep. 2015.
- [7] Y. Feng, X. Yu, and F. Hani, "High-order terminal sliding-mode observer for parameter estimation of a permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 10, pp. 4272-4380, Oct. 2013.
- [8] S. M. Yang and Y. J. Deng, "Observer-based inertia identification for auto tuning servomotor drives," in *Proc. IEEE Conf. Rec. 40th Ind. Appl. Annu. Meet.*, pp. 968-972, 2005.
- [9] J. Davila, L. Fridman, and A. Poznyak, "Observation and identification of mechanical systems via second order sliding modes," *Int. J. Control*, Vol. 79, No. 10, pp. 1251-1262, Oct. 2006.
- [10] J. Davila, L. Fridman, and A. Levant, "Second-order sliding-mode observer for mechanical systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 50, No. 11, pp. 1785-1789, Nov. 2005.
- [11] X. Zhang and Z. Li, "Sliding mode observer-based mechanical parameter estimation for permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 8, pp. 5732-5745, Aug. 2016.



김형우(金兄禹)

1988년 1월 26일생. 2012년 부산대 전기전자 컴퓨터공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기 전자컴퓨터공학과 졸업(석사) 2015년~현재 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 박사과정.



최준영(崔峻暎)

1970년 11월 17일생. 1994년 포항공과대학교 전기전자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공박). 2005년~현재 부산대 전자공학과 교수.