

## 확장된 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 로봇 관절 부하 관측기

김형우\*, 이재경\*, 이혁진\*, 이창혁\*, 홍지태\*, 김홍주\*  
한국전기연구원\*

### Robot Joint Load Observer Using Extended Sliding Mode Observer

Hyoung-Woo Kim\*, Jae-Gyeong Lee\*, Hyuk Jin Lee\*, Chang-Hyuk Lee\*, Ji-Tae Hong\*, Hong Ju Kim\*  
Korea Electrotechnology Research Institute\*

**Abstract** - 본 논문에서는 서보(Servo) 모터 및 드라이브를 기반으로 구동되는 로봇의 회전자에 인가되는 부하를 확장된 슬라이딩 모드 관측기(ESMO, Extended Sliding-Mode Observer)를 이용하여 추정하는 방법에 대해 제안한다. 본 논문에서 제안하는 ESMO 기반 관측기는 영구자석동기기를 로봇의 액츄에이터로 사용하는 시스템에 한하여 적용 가능한 방법이다. 본 논문에서 제안하는 부하 관측법을 이용할 경우, 특정 사용 범위 내에서 토크 센서 기반 부하토크 획득 방식을 대체 할 수 있으며, 기존의 다양한 부하토크 추정법 대비 시스템 매개변수 불확실성 및 매개변수 변동에 강인한 관측 성능을 보이고, 기존의 슬라이딩 모드 관측기(SMO, Sliding-Mode Observer) 대비 높은 채터링 강인성을 가지며, 전류제어주기 수배 이내 주기 내 강인한 실시간 성능으로 액츄에이터 기반 로봇 관절 전체에 인가되는 부하토크를 산출할 수 있는 방법이다.

#### 1. 서 론

액츄에이터의 기계적 매개변수 중 부하토크의 식별을 위해 다양한 식별 방법이 제안되어왔다. 이는 Parameter Adoption, MRAS(Model Reference Adaptive System), EKF(Extended Kalman Filter), RLS(Recursive Least Square), 관측기 기반(Observer-based) 방법의 다섯가지 접근법으로 카테고리화 할 수 있다.

[1]의 Parameter Adoption 방법은 적응 법칙 이득 조절을 통한 기계적 매개변수 식별을 수행하나, 구현 복잡성과 적응 이득 민감도에 의해 응용 적합성 이슈가 존재한다. [2][3]의 MRAS는 구현이 용이하나 부하토크 식별의 실시간성에 취약하다. [4]의 EKF는 부하토크를 시스템 변수로 취급하여 필터 직접 출력을 통해 추정한다. RLS에서는 EKF 방법보다 초기 조건에 상대적으로 의존하며, 긴 처리 시간과 식별 중 기준 속도의 특별한 제약을 요구한다[5].

관측기 기반 방법에서 액츄에이터의 기계적 매개변수는 외란 관측기를 통해 관측된다[6]. 관측기 기반 방법은 시스템 매개변수 불확실성(Parameter Uncertainty)과 매개변수 변동(Parameter Variation)에 대해 약한 강인성(Weak-Robustness)을 보인다. 이러한 단점을 [7]에서는 2차 슬라이딩 모드 관측기(SMO, Sliding-Mode Observer)로 극복하지만 채터링 효과(Chattering Effect) 저감용 저역 통과 필터(Low-Pass Filter)가 필요하다.

본 논문에서는 SMO의 채터링 효과를 극복할 수 있는 ESMO(Extended Sliding-Mode Observer)로 SPMSM (Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Machine) 기반 액츄에이터에 대한 부하토크 관측법을 제안한다. 본 방법에 의한 관측법은 허용 가능한 범위의 주기 내 강인한 실시간 성능을 보임과 동시에 별도의 LPF 없이 채터링 강인성과 SMO의 장점을 갖춘 관측 방법이다.

#### 2. ESMO 기반 부하 관측기 설계

로봇의 관절을 구동시키는 액츄에이터가 SPMSM 기반의 서

보 모터라고 가정하고, 해당 SPMSM의 상호 커플링된 자기 포화 와 구조적 비대칭성, 철손, 자기적 와전류손, 자석의 기자력과 회전자 비등방성, 권선법 등에 의한 고조파를 무시할 경우, 동기 속도로 회전하는  $dq$  기준 좌표계에서의 SPMSM의 동적방정식은 아래와 같다.

$$U_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - L_s i_q \omega_e, \quad (1)$$

$$U_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + L_s i_d \omega_e + \omega_e \psi, \quad (2)$$

$$J \dot{\omega} = 1.5 p_p \psi i_q - B \omega - T_L \quad (3)$$

이때,  $i_d$ 와  $i_q$ 는  $dq$ 축 고정자 전류를 의미하고  $U_d$ 와  $U_q$ 는  $dq$ 축 고정자 전압을 의미한다.  $L_s$ 는 고정자 축 인덕턴스를  $R_s$ 는 고정자 축 저항값을 의미하며  $\psi$ 는 회전자 쇄교자속을 의미하고  $\omega_e$ 는 전기적 각속도를 의미한다.  $\omega$ 는 기계적 각속도를 의미하고  $J$ 는 회전자 관성을  $B$ 는 점성 감쇄 계수를  $p_p$ 는 극쌍수를 의미하며,  $T_L$ 는 부하토크를 의미한다.

$T_L$ 을 시스템 외란(Disturbance)으로 간주하고, 파라미터 불확실성이 존재한다고 가정하였을 때, (3)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$J_0 \dot{\omega} = 1.5 p_p \psi i_q - B_0 \omega + d. \quad (4)$$

이때,  $J_0$ 는 회전자 관성의 공칭값을 의미하며,  $B_0$ 는 점성 감쇄 계수의 공칭값을 의미하며  $d$ 는 시스템 외란 성분으로써 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$d = -\Delta J \dot{\omega} - \Delta B \omega - T_L \quad (5)$$

이때,  $\Delta J$ ,  $\Delta B$ 는 실제 회전자 관성과 실제 점성 감쇄 계수와 그들의 공칭값 간의 파라미터 오차를 의미한다. 식 (3)~(5)로부터 본 논문에서 제안하는 확장된 슬라이딩 모드 관측기는 아래와 같이 설계할 수 있다.

$$J_0 \dot{\hat{\omega}} = 1.5 p_p \psi i_q - B_0 \hat{\omega} + \hat{d} + k_{sm} \text{sgn}(S), \quad (6)$$

$$\hat{d} = k_{smo} k_{sm} \text{sgn}(S). \quad (7)$$

이때,  $\hat{\omega}$ 는 기계적 각속도  $\omega$ 에 대한 추정값을 나타내며,  $\hat{d}$ 는 외란의 추정값을 나타내며  $k_{sm}$ 은 슬라이딩 모드 이득을 나타내며,  $k_{smo}$ 는 슬라이딩 모드 관측 이득을 나타내고,  $S$ 는 슬라이딩 모드 평면으로써  $S = \omega - \hat{\omega}$ 와 같이 정의된다.

슬라이딩 모드 동작이 발생하였을 때, 속도의 추정값은 허용 가능한 범위 내  $\omega \approx \hat{\omega}$ 가 되므로 (6)에서  $\hat{\omega}$ 를  $\omega$ 로 대체할 경우 (8)을 얻을 수 있다.

$$J_0\dot{\omega} = 1.5p_p\psi i_q - B_0\omega + \hat{d} + k_{sm}sgn(S). \quad (8)$$

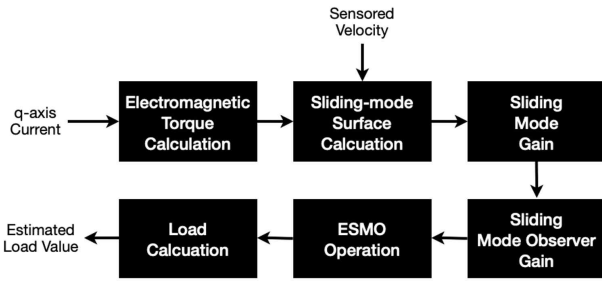
(4), (7), (8)을 이용할 경우 (9)의 식을 얻을 수 있고,

$$d = \hat{d} + \frac{1}{k_{smo}}\dot{\hat{d}}, \quad (9)$$

이는 주파수 영역에서 (10) 과 같이 변환 된다.

$$[\hat{d}] = \frac{k_{smo}}{s + k_{smo}}[d]. \quad (10)$$

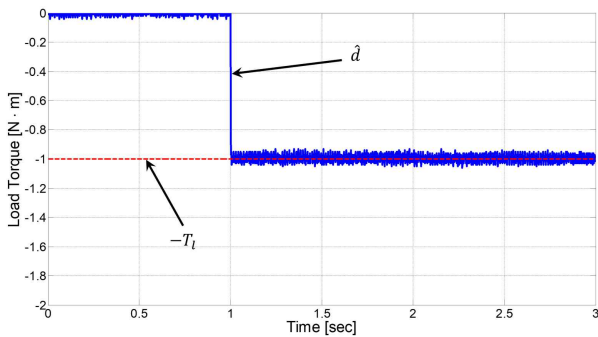
(10)은  $d$ 를 입력으로 하고  $k_{smo}$ 에 의해 대역폭이 결정되는 저역통과필터와 출력  $\hat{d}$  간 관계를 보여준다. 이를 통해 (6)과 (7)과 같이 설계한 ESMO가 최종적으로  $k_{smo}$ 를 통해 결정되는 저역통과필터에 의해 채터링 효과를 억제한 형태의  $\hat{d}$ 를 출력한다는 것을 알 수 있다. 허용 가능한 오차 범위 내에서  $B \approx B_0$ ,  $J \approx J_0$ 가 성립할 경우  $d \approx -T_L$ 이 됨을 알 수 있고, 이는 ESMO를 통해 출력된  $\hat{d} \approx -T_L$ 을 만족시킨다. (6)~(10)을 통한 전체적인 부하 산출 동작 블록도는 그림 1과 같다.



<그림 1. ESMO 기반 부하 관측 동작 블록도>

### 3. 부하 관측 실험

QEP(quadrature encoder pulse) 기반 엔코더를 탑재한 1 kW 급 SPMSM 서보 모터 기반 액츄에이터에 1 N·m의 상수 부하 토크를 인가하고 있을 때, 1 sec에서 동작 시작 명령을 내린 ESMO 기반 부하 관측기의 출력 파형은 그림 2의 파란색 파형과 같다. 해당 그림에서 파란색 파형은 추정된 외란  $\hat{d}$ 를 의미하며, 이때 이는  $-T_L$ 에 근사해있다고 보았을 때, 해당 그림 내 붉은 점선 파형인 실제 인가해준 토크의 음의 값인  $-T_L$ 에 수렴하는 결과를 확인할 수 있다.



<그림 2. 부하 추정 실험 결과>

해당 액츄에이터의 ESMO를 이용한 부하 추정 당시의 RPM(Rounds Per Minute)은 정격 3000 RPM 기준 1500 RPM

이었으며, 이때, PI(Proportional-Integral) 제어 기반 벡터제어기 및 ESMO 부하 추정기에서 사용된 제어 파라미터들 중 점성 감쇄 계수  $B$ 는 0.0016655 N·m·s/rad 이며, 회전자 관성은 0.0146 kg·m<sup>2</sup>, SPMSM의 극쌍수  $p_p$ 는 4였으며  $R_s$ 는 1.02 Ω,  $L_s$ 는 8.25 mH, 회전자 쇄교 자속은 0.113 Wb의 공칭값을 이용하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서 제안한 ESMO 부하 관측기를 이용한 로봇 관절 부하 관측 시 알고리즘 동작의 특성으로부터 관측동작의 채터링 억제 능력은 보장되나, 상기 서술된 내용과 같이 시스템 매개변수의 정확도가 실제 관측기 출력의 관측 정밀도와 직결된다는 특성을 알 수 있다. 따라서, 해당 관측기를 적용함에 있어 해당 정밀도 문제를 포함할 수 있는 응용에 적용 가능한 부하관측방법이라는 것을 알 수 있으며, 나아가 해당 매개변수에 대한 실시간 추정 성능이 동반된 알고리즘과 함께 동작 시 기계적 부하에 대한 추정 성능이 증가할 수 있음을 기대할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본사업(No. 22A01053)에 의한 연구 결과물임

### [참고 문헌]

- [1] Piippo, A., Hinkkanen, M., Luomi, J.: 'Active online system identification of switch mode DC-DC power converter based on efficient recursive DCD-IIR adaptive filter', IEEE Trans. Power Electron., 2012, 27, (11), pp. 4425 - 4435
- [2] Nguyen. T.H., Lee, D.-C.: 'Deterioration monitoring of DC-link capacitors in AC machine drives by current injection', IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30, (3), pp. 1126 - 1130
- [3] Renaudineau, H., Martin, J.-P., Nahid-Mobarakeh, B., et al.: 'DC-DC converters dynamic modeling with state observer-based parameter estimation', IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30, (6), pp. 3356 - 3363
- [4] Aung, H., Low, K.S., Ting G.S.: 'State-of-charge estimation of lithium-ion battery using square root spherical unscented Kalman filter (Sqrt-UKFST) in nanosatellite', IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30, (9), pp. 4774 - 4783
- [5] Feng, Y., Yu, X., Hani, F.: 'High-order terminal sliding-mode observer for parameter estimation of a permanent-magnet synchronous motor', IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60, (10), pp. 4272 - 4380
- [6] Ding, Z.: 'Consensus Disturbance Rejection With Disturbance Observers', IEEE Trans. Ind. Electron., 2015, 62, (9), pp. 5829 - 5837
- [7] Lu, W., Zhang, Z., Wang, D., et al.: 'A New Load Torque Identification Sliding Mode Observer for Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System', IEEE Trans. Power Electron., 2019, 34, (8), pp. 7852 - 7862