



선박용 전기추진시스템을 위한 PMSM의 센서리스 제어성능에 영향을 미치는 SMO와 PI 제어기의 영향 분석

정태영[†] · 정석권 · 이재민
[†]부경대학교(교수) · 부경대학교(학생)

Analysis of Effect of SMO and PI controllers on Sensorless Control Performance of a PMSM for Electrical Propulsion System of Small Ships

Tae-Young JEONG[†] · Seok-Kwon JEONG · Jae-Min LEE
[†]Pukyong National University(professor) · Pukyong National University(student)

Abstract

This paper analyzes some effects on sensorless speed control performance of a sliding mode observer (SMO) for building electric propulsion system of small ships using a permanent magnet synchronous motor (PMSM). An adaptive observer gain and switching function in the SMO are analyzed in detail to reduce the chattering phenomenon in estimated back electromotive force information. Furthermore, cascade low pass filter and PI controller gains are also investigated to progress speed sensorless control performance especially in low speed area. The results of simulations and experiments considering a 1.5 kW PMSM are provided to assure the effectiveness of the optimized SMO and controllers. The results show that the optimized SMO, cascade low pass filter, and controllers can give good speed sensorless control performances even when the PMSM operates at 5rpm.

Key words : Electric propulsion system, Permanent magnet synchronous motor, Sliding mode observer, Cascade low-pass filter, Adaptive observer gain

I. 서론

친환경 해상 수송시스템 구현을 위해, 선박의 전기추진시스템(EPS: Electric Propulsion System)에 대한 수요와 관심이 증가하고 있다.

대형 선박들은 기존의 추진기 구동용 주기판 대신 발전기와 유도모터를 구동하는 방식을 주로 채택하고 있다(Nam, 2005). 수십 톤 크기의 선박은 주기판에 부착된 PTO(Power Take Off)를 통해

고속으로 운항 시 축전지에 전기에너지를 저장하고, 저속운항 시 충전된 전기에너지로 모터를 구동하여 선박을 추진함으로써 에너지 효율 향상과 유해 배기가스 저감을 실현하는 방안이 제안되어 있다. 향후 수 톤 이하의 소형 선박들은 태양에너지와 같은 친환경에너지를 이용해 에너지를 축전지에 저장하고 가솔린 구동의 선외기 대신 전기모터를 장착한 전기모터 선외기 추진 방식으로 전환될 가능성이 매우 높다(Choi et al., 2018).

[†] Corresponding author : 051-629-5998, tyjeong@pknu.ac.kr

※ 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

영구자석형 동기모터(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)는 컴팩트한 구조에 중량과 체적 대비 대출력이어서 소형 선박용 추진기 구동 모터로서 최적이다. 다만 구동을 위해 회전자 자속 위치 정보가 필요하므로 엔코더(encoder) 또는 레졸버(resolver)와 같은 속도센서를 겸한 자극 위치 검출용 물리적 센서를 필요로 한다. 이로 인해 모터 고유의 강건성과 제어 신뢰성이 약화되고, 생산 단가 상승, 체적과 중량 증가 등을 유발한다. 소형 선박의 경우, 전기모터가 장착될 기관실이나 선외기 공간은 매우 열악한 환경이므로 이상적으로는 PMSM의 센서리스 제어계 구축이 가장 바람직하다(Ren et al., 2014).

PMSM의 센서리스 속도제어에 관한 연구로는 다양한 방식들이 제안되어 있으며, 대부분 SMO(Sliding Mode Observer) 모델 기반에 모터의 역기전력(B-EMF: Back Electromotive Force)으로부터 자속의 위치를 추정하고 이를 통해 속도를 추정한다(Jung and Kim, 2009). 하지만, 이 방법은 저속에서 B-EMF 정보에 포함된 다수의 고조파로 인해 제어성능이 열화하는 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 개선된 SMO와 캐스캐이드 저주파 필터(C-LPF: Cascade-Low Pass Filter)를 통해 극 저속 영역까지 센서리스 제어를 달성한 바 있다(Jeong et al., 2017).

개선된 방안은 속도 지령에 연동해 관측기 게인이 가변되는 포화함수 및 가변 차단주파수를 갖는 2차 LPF, 위상지연 보상이 주된 요소이지만 이들이 센서리스 제어성능에 미치는 영향에 대해서는 구체적으로 검토되지 않았다. 또한 속도제어계에 포함된 제어기 설계에 대한 내용이 결여되어 있어 설계 자료로 활용하기 어려운 부분이 있었다.

특히 제어기의 경우, 주된 속도제어기(ASR: Auto Speed Regulator)와 더불어 두 개의 전류제어기(ACR: Auto Current Regulator)를 내부루프로 갖는 까닭에 PI 제어기로 설계할 경우 6개의 게인을 설계해야 하는 번거로운 문제점이 있어 광

대역 게인 탐색법인 GA(Genetic Algorithm)가 제안된 바 있다(Wibowo and Jeong, 2013).

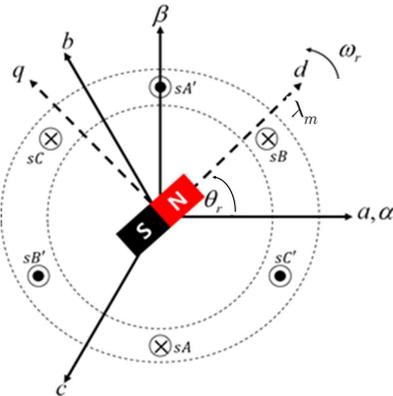
결국 PMSM의 전 속도 영역에 걸친 양호한 센서리스 제어성능 확보를 위해서는 SMO 뿐만 아니라, C-LPF와 제어기 게인까지를 포함한 영향들을 종합적으로 분석, 고찰할 필요가 있다.

본 연구에서는 소형 선박용 EPS 구현을 위한 PMSM의 센서리스 제어성능 향상을 위하여 SMO 관련 인자와 PI 제어기 게인이 제어성능에 미치는 영향을 분석하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어성능에 대하여 고찰하고자 한다.

II. 연구 방법

1. SMO 기반 속도센서리스 제어

평형3상 PMSM의 회로방정식 유도 및 전류 모델 구성을 위한 좌표계는 [Fig. 1]과 같다.



[Fig. 1] Coordinate of a SPMSM

여기서 λ_m 은 회전자 영구자석의 최대 자속, θ_r 은 회전자 자극 위치, ω_r 은 회전자의 각속도 ($\omega_r = d\theta_r/dt$), sA, sB, sC 는 고정자 권선의 상전류 입력, sA', sB', sC' 는 출력을 각각 의미한다.

$\alpha - \beta$ 고정자 기준 좌표계에서의 전류 및 역기전력은 식(1), (2)와 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} p i_\alpha \\ p i_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad \dots\dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = w_r \lambda_m \begin{bmatrix} -\sin\theta_r \\ \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 v_α, v_β 와 i_α, i_β 는 고정자 전압과 전류, R_s, L_s 는 고정자 저항과 인덕턴스, 기호 p 는 미분연산자, e_α, e_β 는 역기전력을 각각 나타낸다.

이 시스템에 전류 추정 모델을 통해 전류 오차를 구하고 식(3)의 슬라이딩 평면을 적용하면 B-EMF는 식(4)와 같다(Jeong et al, 2017).

$$S = [i_\alpha \ i_\beta]^T - [\hat{i}_\alpha \ \hat{i}_\beta]^T \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$[\hat{e}_\alpha \ \hat{e}_\beta]^T = K \operatorname{sgn}([\bar{i}_\alpha \ \bar{i}_\beta]^T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 기호 “ \wedge ”는 추정값, “ $-$ ”는 전류 추정오차, T는 행렬(벡터)의 전치(transpose)를 나타낸다. K 는 관측기 게인으로 식(3)에 대한 리아프노프의 안정조건으로부터 $K > \max(|e_\alpha|, |e_\beta|)$ 로 구해진다. 식(4)의 역기전력 추정 값이 스위칭에 의한 고조파를 포함하므로 식(5)의 1차 LPF를 캐스케이드로 연결한 식(6)의 2차 LPF를 사용한다. 식에서 ω_c 는 차단각주파수로 속도 n 에 연동되는 형태로 $\omega_c = 2\pi n P/120$ 이며, P 는 모터 극수(8극)를 의미한다.

$$[\hat{e}_\alpha \ \hat{e}_\beta]^T = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} [\bar{e}_\alpha \ \bar{e}_\beta]^T \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$LPF_{2nd} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

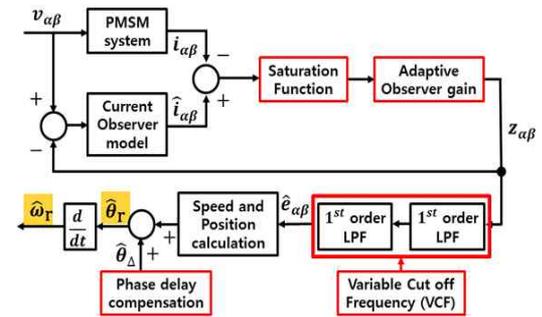
식(4)로부터 식(2)의 좌변인 역기전력을 추정하면, PMSM의 회전자 자극 위치는 식(7), 속도는 식(8) 또는 식(9)로 추정할 수 있다. 따라서 자극 위치와 속도 검출을 위한 물리적 센서 없이 속도 제어가 가능하게 된다.

$$\hat{\theta}_r = -\tan^{-1} \frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\hat{\omega}_r = \frac{d\hat{\theta}_r}{dt} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\hat{\omega}_r = \frac{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}}{\lambda_m} \quad \dots\dots\dots (9)$$

식(4)의 스위칭 함수를 포화함수로, 그리고 그 계인을 속도에 연동된 적응형으로, 필터를 식(6)과 같이 개선한 후, 속도 연동의 차단각주파수 ω_c 를 갖는 위상지연 보상기가 부가된 속도 추정을 위한 개략도는 [Fig. 2]와 같다.



[Fig. 2] Speed estimation by the updated SMO

2. 센서리스 제어 성능 영향 인자

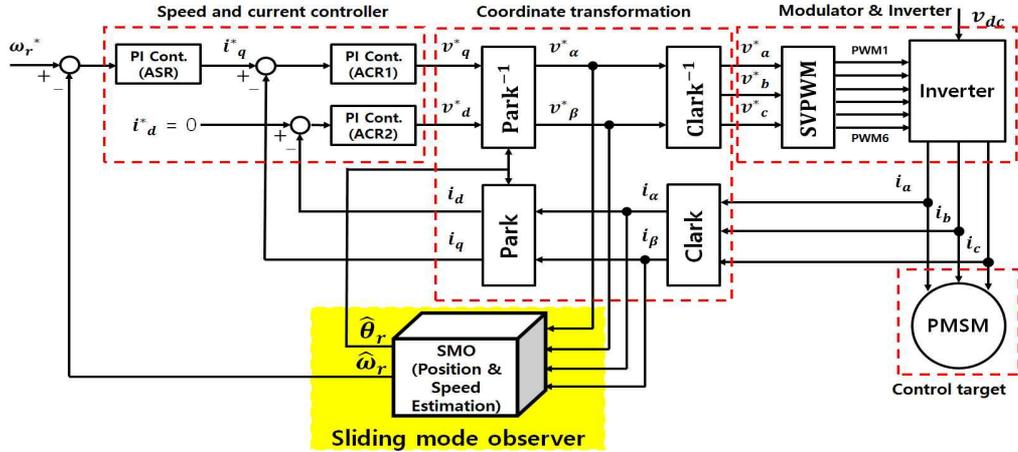
SMO와 전형적인 FOC(Field Oriented Control) 벡터제어에 기반한 PMSM의 센서리스 제어 블록도는 [Fig. 3]과 같다. 센서리스 제어 성능에 영향을 미치는 설계 인자는 크게 SMO 관련인자와 속도 및 전류제어용 PI 제어기로 구분된다. SMO 관련 인자로는 스위칭 함수, 관측기 게인, 저역통과필터(LPF), 위상지연 보상기를 들 수 있다.

우선 스위칭 함수는 식(4)의 부호(signum, sgn) 함수 대신 식(10)의 포화(saturation, sat)함수를 사용한다.

$$[\hat{e}_\alpha \ \hat{e}_\beta]^T = K \operatorname{sat}([\bar{i}_\alpha \ \bar{i}_\beta]^T) \quad \dots\dots\dots (10)$$

식(10)의 게인 K 는 리아프노프(Lyapunov)의 안정 조건 $V > 0, \dot{V} < 0$ 로부터 식(11)과 같이 구해졌다. 이때 $V = S^T S/2$ 로 가정하였고, 식(2)의

선박용 전기추진시스템을 위한 PMSM의 센서리스 제어성능에 영향을 미치는 SMO와 PI 제어기의 영향 분석



[Fig. 3] Block diagram of the sensorless vector control system based on the FOC and SMO

역기전력은 $\sin\theta_r, \cos\theta_r$ 의 값이 1일 때 최대값이므로 식(2)를 식(11)에 대입하여 K 를 식(12)와 같이 속도 지령에 연동한 적응형 게인으로 하였다.

$$\dot{V} = (e_{as} - K) \frac{|i_{as}|}{L_s} + (e_{\beta s} - K) \frac{|i_{\beta s}|}{L_s} < 0 \quad (11)$$

$$K = \omega_r^* \lambda_m \dots \dots \dots (12)$$

식(5)의 1차 LPF로는 채터링의 저감이 충분하지 못해 이를 직렬로 연결한 식(6)의 2차필터를 적용하였다. 그 주파수전달함수인 식(13)으로부터 위상지연각 식(14)를 산출하여 위상지연 보상기 식(15)를 설계하였다. 여기서 $\hat{\omega}_e$ 는 $\hat{\omega}_e = P\omega_r$ 이다.

$$G_{LPF2}(j\hat{\omega}_e) = \frac{\omega_c^2}{-\hat{\omega}_e^2 + j2\zeta\omega_c\hat{\omega}_e + \omega_c^2} \dots \dots \dots (13)$$

$$\angle G(j\hat{\omega}_e) = \hat{\theta}_{ec} = -\tan^{-1} \frac{2\hat{\omega}_e\omega_c}{\omega_c^2 - \hat{\omega}_e^2} \dots \dots \dots (14)$$

$$\hat{\theta}_{\Delta} = \tan^{-1} \frac{2\hat{\omega}_r\omega_c}{\omega_c^2 - \hat{\omega}_e^2} \dots \dots \dots (15)$$

[Fig. 3]에서 속도센서리스 제어를 위해서는 ASR 하나와 두 개의 ACR을 필요로 한다. PI 제

어기로 설계할 경우 6개의 게인을 결정해야 하므로 그 과정이 매우 번거롭다.

따라서 본 연구에서는 주파수 응답법(FRM: Frequency Response Method)에 기초하여 이들을 <Table 1>과 같이 설계하였고, 비교 시뮬레이션을 위해 GA로 구한 게인을 동시에 나타내었다 (Lee, 2018).

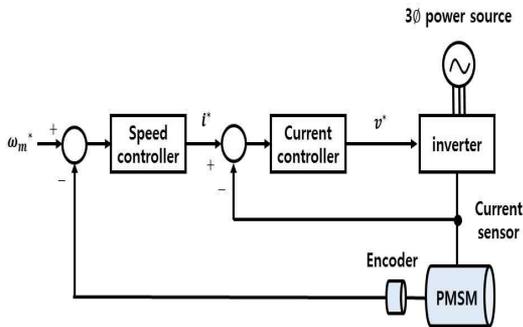
<Table 1> PI gains based on FRM and GA

Controllers	FRM		GA		
	K_p	K_i	K_p	K_i	
Speed	2.42	48.33	2.43	27.78	
Current	d-axis	2.45	200	4.08	81.63
	q-axis	2.45	200	4.08	81.63

3. 최적 제어계 구성

최적으로 설계된 설계 인자들의 제어성능을 분석하기 위한 제어계의 구성은 [Fig. 4]와 같다. 센서리스 제어와 센서 제어의 성능을 비교하기 위해 실험장치에는 속도센서(encoder)가 부착되었고, 그림에는 생략되어 있으나 센서리스 제어를 위해 실제로는 [Fig. 3]의 알고리즘이 내장되었다.

그리고, 이 장치에 장착된 실험용 SPMSM의 제원은 <Table 2>와 같다.



[Fig. 4] Configuration of motor control system

<Table 2> Parameters of the tested SPMSM

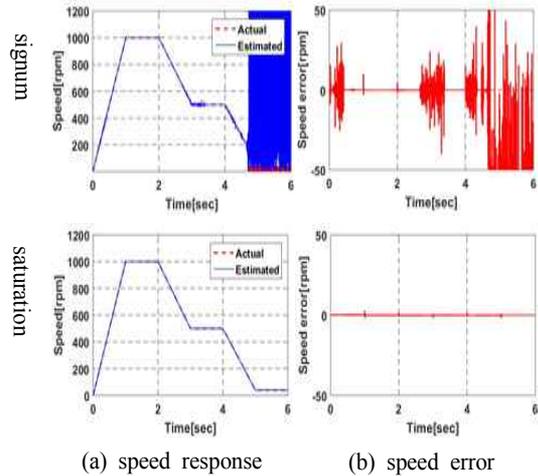
Parameter(symbol)	Value (unit)
Rated power (P_r)	1.5 (kW)
Rated torque (T_r)	7.16 (N.m)
Rated speed (N_r)	2,000 (rpm)
Stator resistance (R_s)	0.4 (Ω)
Stator inductance (L_s)	4.9×10^{-3} (H)
Flux linkage (λ_m)	0.145 (Wb)
Inertia (J)	1.45×10^{-3} (Kg.m ²)

III. 결과 및 고찰

전술한 제어계의 설계 인자들이 센서리스 제어 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션과 실험을 진행하였다. SMO 설계 인자 가운데는 예비 시뮬레이션과 실험을 통해 가장 큰 영향 인자인 스위칭함수, 관측기 계인, 위상보상기를 갖는 LPF의 세 가지 요소에 대해서, 그리고 ASR과 ACR에 사용된 PI 제어기의 경우, FRM과 GA로 얻은 계인에 의한 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 및 실험에서 ASR과 ACR의 샘플링타임은 500 μ s와 100 μ s로 각각 설정하였다.

스위칭 함수가 속도 센서리스 제어성능에 미치는 영향을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과는 [Fig. 5]와 같다. 무부하 상태에서 속도를 0에서 1,000, 500, 40 rpm으로 제어하여 부호함수와 포화함수의 영향을 비교하였다. 이때 관측기 계인

은 고정값(121), 필터는 차단주파수가 고정 ($f_c = 133.3Hz$)된 위상보상기를 갖는 1차 LPF를 사용하였다. 포화함수가 전 속도 영역에 걸쳐 적은 채터링을 발생, 양호한 센서리스 제어성능을 보였다. 부호함수는 특히 저속 영역에서 큰 채터링을 발생, 큰 속도오차를 보였다.

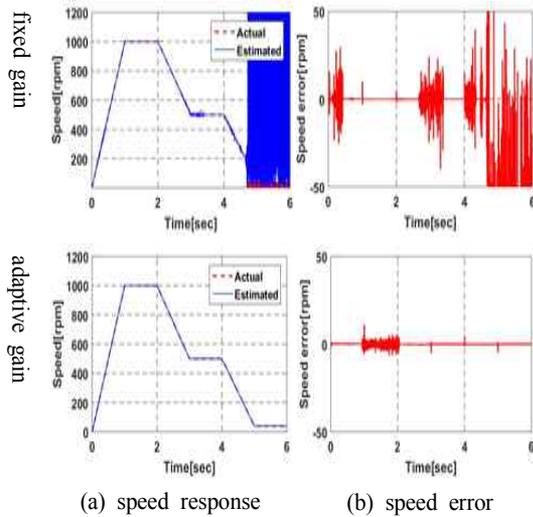


[Fig. 5] Simulation result for comparison between signum function and saturation function in the SMO

관측기 계인의 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션 결과는 [Fig. 6]과 같다. [Fig. 5]의 시뮬레이션과 동일한 속도, 부호함수(sgn), 1차 LPF 조건 하에서 계인이 고정값인 경우와 식(12)와 같이 적응형의 두 종류를 시뮬레이션 하였다. 고정값은 121로 설정하였고, 특히 저속 영역에서 큰 채터링을 발생하였다. 속도 적응형 계인은 저속에서도 거의 채터링을 발생시키지 않았으나 고속에서 다소 큰 속도오차를 보였다.

LPF의 성능 비교를 위한 시뮬레이션 결과는 [Fig. 7]과 같다. 1차 LPF와 2차 필터의 성능 비교 시, 스위칭함수(sgn)와 고정값의 관측기 계인이 사용되었다. 2차 LPF는 저속 영역에서도 충분한 고조파 저감 성능을 발휘, 양호한 제어성능을 보였다. 이때 1차 LPF의 차단주파수 f_c 는

선박용 전기추진시스템을 위한 PMSM의 센서리스 제어성능에 영향을 미치는 SMO와 PI 제어기의 영향 분석



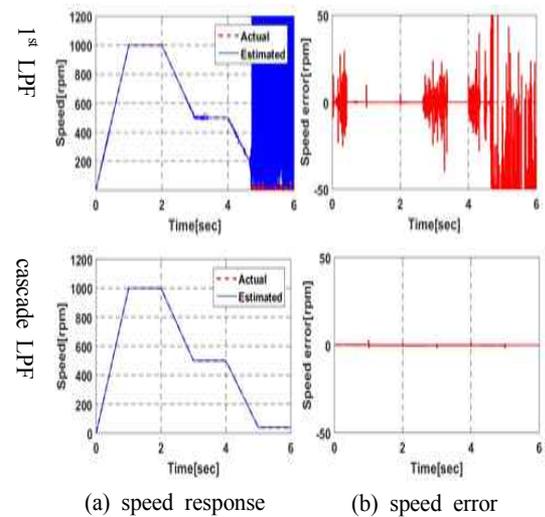
[Fig. 6] Simulation result for comparison between fixed gain and adaptive gain in the SMO

PMSM의 최대 각주파수를 고려하여 133.3 Hz로 설정하였고, 2차 LPF는 속도에 연동된 차단주파수를 갖도록 설계하였다. 정상상태의 속도오차가 [Fig. 5]와 유사해 보이지만, 확대된 그래프에서 수 rpm의 속도오차를 갖는 것으로 확인되었다.

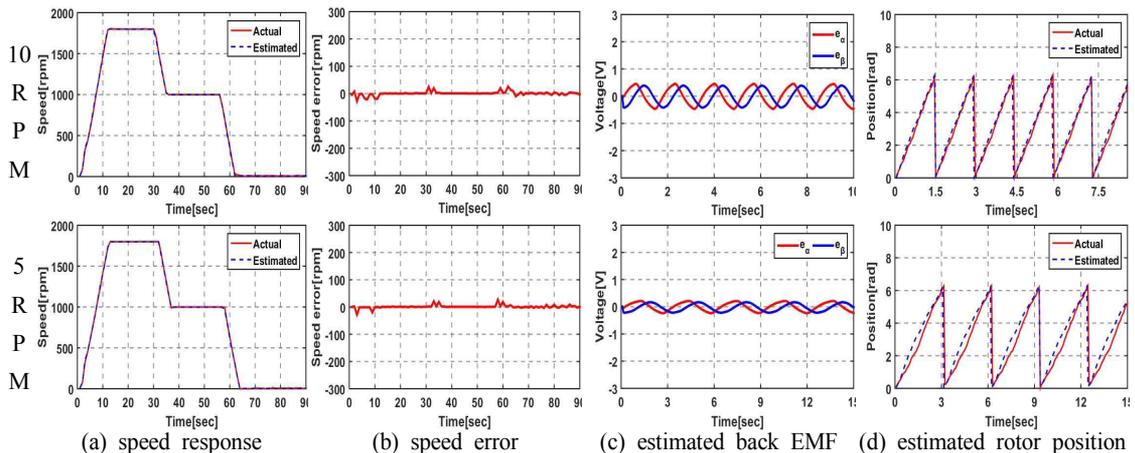
최적으로 설계된 SMO와 PI 제어기를 이용하여 제어기 성능이 특히 열화되는 10 rpm과 5 rpm의 극 저속 영역에 주목하여 속도 센서리스 제어성능을 확인한 실험 결과는 [Fig. 8]과 같다.

5 rpm의 경우, 속도 제어성능은 양호하지만 추정된 자극 위치에 미소한 에러가 발생함을 확인할 수 있다.

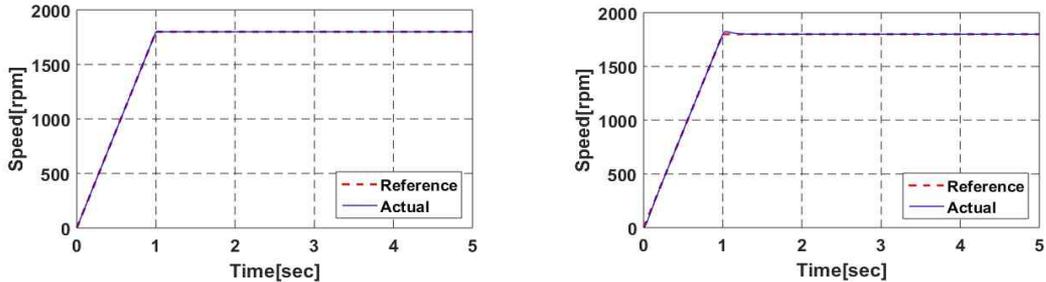
PI 제어기를 FRM과 GA로 <Table 1>과 같이 설계했을 경우의 제어성능 비교는 [Fig. 9]와 같이 나타났다. FRM 결과가 GA와 동등 또는 그 이상임을 알 수 있다. 지면 제약으로 생략하였으나 SMO 관련 인자들이 최적으로 설계되면 PI 제어기는 공칭 설계값의 1.5배 이내에서는 센서리스



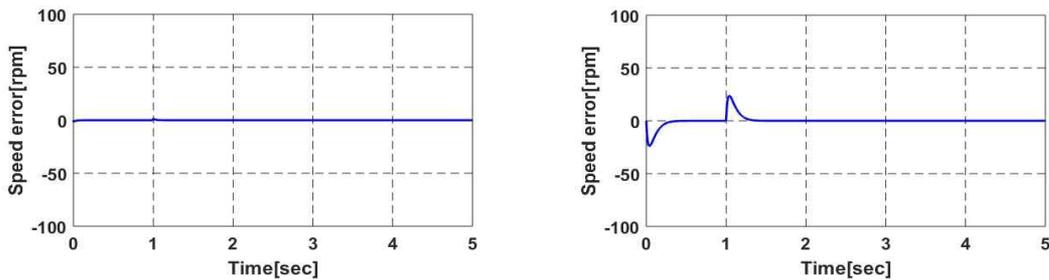
[Fig. 7] Simulation result for comparison between 1st LPF and 2nd LPF in the SMO



[Fig. 8] Experimental result of the sensorless PMSM with the optimized SMO and PI controllers



(a) speed response of FRM(left) and GA(right)



(b) speed error response of FRM(left) and GA(right)

[Fig. 9] Simulation result for comparison between FRM and GA for PI controller

제어성능에 거의 영향을 미치지 않았다. 또한 식 (9)에 의한 속도 추정은 필터 통과 후 역기전력 정보 크기에 감쇠가 발생하여 실제값과 큰 오차를 보이므로 식(8)의 사용이 바람직하다.

결국 SMO 기반의 속도 센서리스 제어의 경우, 전 속도 영역에 걸친 우수한 제어성능 확보를 위해서는 SMO 관련 설계 인자들을 최적으로 설계하는 것이 가장 중요함을 확인하였다. 특히, 스위칭함수의 선택과 충분한 고조파 저감을 위해 2차 LPF, 그리고 관측기 계인의 적응형 설계가 중요함을 확인하였다. 한편, ASR과 ACR의 PI 제어기는 FRM으로 설계가 가능함을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 소형 선박용 전기추진시스템 구현을 위한 PMSM의 센서리스 제어성능 향상에 주목, SMO 관련 인자와 PI 제어기 계인이 제어

성능에 미치는 영향을 상세히 분석하였다. Matlab 기반의 시뮬레이션과 실제 실험을 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

SMO 관련 설계 인자와 PI 제어기 계인의 영향 분석 결과, SMO 관련 인자들이 제어성능에 더 큰 영향을 미쳤다. 특히 스위칭함수, LPF, 관측기 계인 순으로 이들 세 요소가 제어성능에 가장 큰 영향을 미쳤다.

ASR과 ACR의 PI 제어기 계인은 FRM으로 설계하더라도 광대역 탐색법인 GA로 설계한 계인 과 동등, 그 이상의 제어성능을 나타내었다. 따라서 이 방법이 제어기 계인 설계 수단으로 유용함을 확인하였다.

ASR과 ACR의 PI 제어기 계인은 SMO가 최적으로 설계된 상태에서는 제어성능에 그다지 영향을 미치지 않았다. 또한, SMO 인자들이 최적 설계된 상태 하에서는 이들 PI 계인은 공칭 설계값의 1.5배 이내로 변동하더라도 양호한 제어성능을 보였다.

SMO 관련 설계 인자 및 PI 제어기를 최적으로 설계한 후, 실제 실험을 통해 0.0025 p.u.에 상당하는 5 rpm과 같은 극 저속 영역에서부터 전속도 영역에 걸쳐 양호한 센서리스 제어성능이 확보됨을 확인하였다. 특히 시뮬레이션에서는 전속도 영역에서 센서리스 제어가 가능함을 확인하였다.

이 결과들은 향후 소형 선박의 전기추진시스템 구축을 위한 PMSM의 센서리스 제어기 설계 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Accetta A, Cirrincione M and Pucci M(2012). TLS EXIN based neural sensorless control of a high dynamic PMSM, *Control Eng. Pract.*, 20(7), 725~732.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.03.012>
- Baohua L, Jianhua Y and Weiguo L(2009). Study on speed sensorless SVM-DTC system of PMSM, 2009 9th Int. Conf. Electron. Meas. Instruments, 914~919.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICEMI.2009.5274418>
- Choi GH, Yang JH, Jeong TY and Jeong SK(2018). Charging and discharging characteristics analysis of a battery for a hybrid electric propulsion system, *Journal of KSPSE*, 22(4), 39~46.
<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.039>
- Jang JH, Sul SK and Ha JI(2003). Sensorless Drive of Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor by High-Frequency Signal Injection Based on Magnetic Saliency, *IEEE Trans. Ind.*, 39(4), 1031~1039.
<http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2003.813734>
- Jeong TY, Wibowo WK and Jeong SK(2017). Sensorless control of a permanent magnet synchronous motor for electric propulsion system of small ships, *JFMSE*, 29(3), 778~784.
<http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2017.29.3.778>
- Jung YS and Kim MG(2009). Sliding Mode Observer for Sensorless Control of IPMSM Drives, *J. Power Electron.*, 9(1), 117~123.
- Lee H and Lee JM(2013). Design of Iterative Sliding Mode Observer for Sensorless PMSM Control, *IEEE Transactions Control Systems Technology*, 21(4), 1394~1399.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2012.2199493>
- Lee JM(2018). Sliding mode observer design for sensorless control of PMSM in extremely low speed area, Thesis of MS in PKNU. 1~134.
- Nam TG(2005). The Latest Technology of Electric Propulsion Ship, *Journal of Korean Society of Marine Engineering*, 29(2), 149~153.
- Ren JJ, Liu YC, Wang N and Liu SY(2014). Sensorless control of ship propulsion interior permanent magnet synchronous motor based on a new sliding mode observer, *ISA Trans*, 1~12.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2014.08.008>
- Wibowo WK and Jeong SK(2013). Genetic algorithm tuned PI controller on PMSM simplified vector control, *J. Cent. South Univ.*, 20(11), 3042~3048.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11771-013-1827-x>

-
- Received : 12 October, 2018
 - Revised : 15 November, 2018
 - Accepted : 29 November, 2018