



식(1)은  $\omega_{rm}^2$  성분이 포함된 비선형 방정식이므로, 외란 관측기를 설계하기 위해 먼저 이를 선형화 시켜야 한다. 식(1)을 동작점  $\omega_o$ 에서 선형 근사화하면 운동방정식은 식(2)와 같이 표현되며 이를 통해 구성된 페루프 관측기는 식(3)과 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + (B + 2A\omega_o)\omega_{rm} - A\omega_o^2 + T_d \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\theta}}_{rm} \\ \dot{\hat{\omega}}_{rm} \\ \dot{\hat{T}}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\hat{B} + 2\hat{A}\omega_o}{\hat{J}} & -\frac{1}{\hat{J}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{rm} \\ \hat{\omega}_{rm} \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\hat{J}} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (3)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\hat{A}}{\hat{J}} \\ 0 \end{bmatrix} \omega_o^2 + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} [\theta_{rm} - \hat{\theta}_{rm}]$$

여기서 관측기의 특성 방정식의 근을 삼중근  $\beta$ 로 설정할 경우 관측기의 비례 이득은 식(4)와 같다.

$$l_1 = -3\beta - \frac{\hat{B} + 2\hat{A}\omega_o}{\hat{J}}, l_2 = 3\beta^2 - l_1 \frac{\hat{B} + 2\hat{A}\omega_o}{\hat{J}}, l_3 = \hat{J}\beta^3 \quad (4)$$

그림 3은 외란 토크 관측기가 포함된 전기 보트 추진용 SPMSM 구동 시스템의 전체적인 구성을 보여준다.

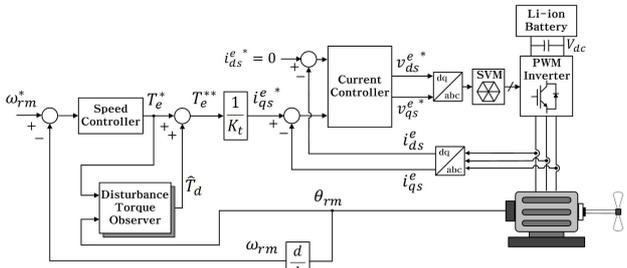


그림 3 외란 관측기가 포함된 속도 제어 시스템

### 3. 실험 결과

그림 4에 본 논문에서 개발한 전기 보트 추진용 SPMSM 구동 시스템이 보인다. 인버터의 직류 전원으로는 직류 전압 220V, 전류용량 15Ah의 3.3kWh 리튬이온 배터리를 사용하였으며 인버터의 스위칭 주파수는 10kHz이다. 추진용 전동기로는 1kW SPMSM을 사용하였고 그 사양은 표 1에 나타내었다.

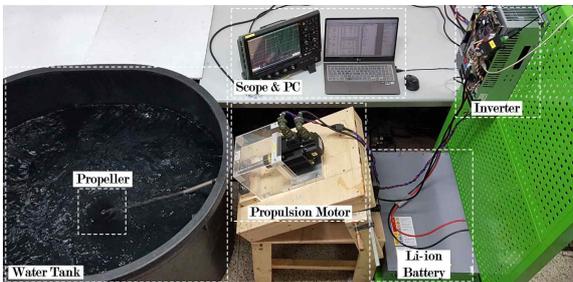


그림 4 전기 보트 추진을 위한 SPMSM 구동 시스템

그림 5는 관측된 외란 토크를 속도 제어기 출력에 보상하기 전, 후의 정상상태 속도 응답을 나타낸다. 외란 토크 성분을 전향 보상한 경우 속도 제어 성능이 개선된 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 추진용 전동기의 정, 역방향 속도 제어 파형을 나타내며 IP제어기를 사용하여 속도 응답에 오버슈트가 존재하지

않는 것을 알 수 있다.

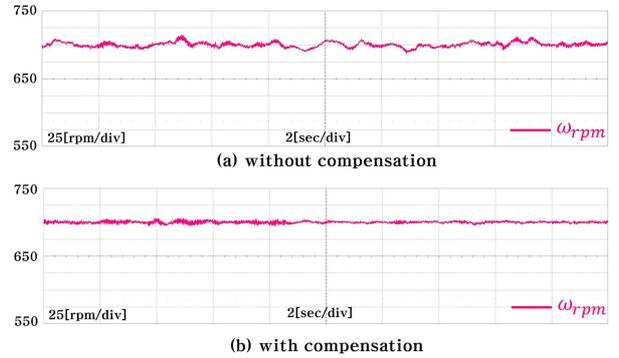


그림 5 외란 토크 보상 전, 후의 속도 파형 (속도지령:700r/min)

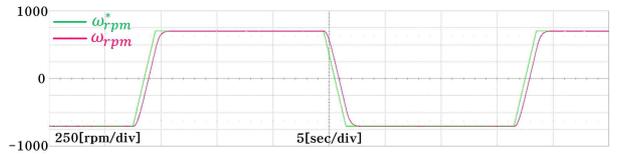


그림 6 정, 역방향 속도 제어 실험 결과

표 1 제어기 이득 및 시스템 파라미터

Speed controller gain		Mechanical parameter	
$\omega_{sc}$	$2 \cdot \pi \cdot 2 \text{ rad/s}$	$J$	$0.0077 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$K_{ps}$	$J \cdot \omega_{sc}$	$B$	0.0034
$K_{is}$	$J \cdot \omega_{sc}^2 / 5$	$A$	0.00021654
$K_{as}$	$1 / K_{ps}$	SPMSM parameter	
Current controller gain		Rated power	1 kW
$\omega_{cc}$	$2 \cdot \pi \cdot 400 \text{ rad/s}$	Pole pair	4
$K_{pd}, K_{pq}$	$L_s \cdot \omega_{cc}$	Rated speed	2000 r/min
$K_{id}, K_{iq}$	$R_s \cdot \omega_{cc}$	Rated current	7.9 A
$K_{ad}$	$1 / K_{pd}$	$R_s$	0.28 $\Omega$
$K_{aq}$	$1 / K_{pq}$	$L_s$	7.5 mH
$\beta$	-10	$\lambda_{pm}$	0.101 Wb

### 4. 결론

본 논문에서는 전기 보트 추진을 위한 SPMSM 구동 시스템을 개발하였다. 속도 제어 성능을 개선하기 위해 외란 토크 관측기를 설계하고, 관측된 외란 토크를 속도제어기 출력에 보상하였다. 본 논문에서 개발한 전기 보트 추진 시스템을 이용하여 추진용 전동기의 속도 제어 특성을 확인하였다.

본 논문은 교육부와 한국연구재단의 지원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

### 참고 문헌

[1] S. H. Kim, *Electric Motor Control, DC AC and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch. 2, 2017.  
 [2] S. Y. Kim, et al., "Suppression of the Thrust Loss for the Maximum Thrust Operation in the Electric Propulsion Ship," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 44, No. 3, pp. 238-247, June. 2007.