

전기 보트 추진용 SPMSM 구동 시스템 개발

김도현, 김상훈

강원대학교 BIT 의료전기전자융합공학

Development of SPMSM Drive System for Electric Propulsion Boat

Do-Hyun Kim, Sang-Hoon Kim

BIT Electrical & Medical Convergent Eng., Kangwon National Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 전기 보트 추진을 위한 SPMSM(Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) 구동 시스템을 개발하였다. 전차원 페루프 관측기를 이용하여 외란 토크 관측기를 구성하고, 관측된 외란 성분을 속도 제어기 출력에 보상하여 속도 제어 성능을 향상시켰다. 리튬이온 배터리, 인버터 및 1kW SPMSM으로 구성된 전기 보트 추진 시스템을 이용한 구동 실험을 통해 추진용 전동기의 속도 제어 특성을 확인하였다.

를 사용할 경우 페루프 전달함수에 존재하는 영점의 영향으로 인해 과도 응답에 오버슈트가 발생할 수 있다.^[1] 본 논문에서는 전동기 회전속도 응답의 오버슈트가 보트 운항 속도에 오버슈트를 발생시키는 것을 방지하기 위하여 전동기의 회전속도 지령 추종을 위한 제어기로 IP(Integral and Propotional) 제어를 사용하였다. 또한 적분기의 포화를 방지하기 위해 안티 와인드업 항을 추가하였다.

1. 서 론

수상 레저, 수상환경 감시 및 보호 등에 활용 가능한 소형 수상 기구는 디젤, 휘발유 등의 화석연료를 사용하는 엔진으로 추진되며, 이는 효율이 낮고 소음 및 수질오염을 발생시킨다. 이에 따라 전동기를 이용한 고효율, 친환경적인 전기 추진 보트의 개발이 요구되고 있다.

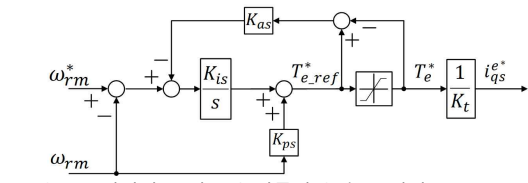


그림 1 IP제어기를 사용한 전동기의 속도 제어 블록도

소형 보트에 적용되는 추진용 전동기로는 효율이 낮으며 정류자와 브러시의 정기적인 유지보수가 필요하여 수명이 짧은 DC 모터를 주로 사용하고 있다. 최근 DC 모터 대신 BLDC(Brushless DC) 모터를 적용한 전기 동력 선외기가 개발된 사례가 있으나 BLDC 모터의 특성상 발생하는 큰 토크 리플로 인해 소음이 발생하며 구동 효율이 낮다.

그림 2는 속도 제어기로부터 주어진 전류 지령을 추종하기 위한 전류 제어 블록을 나타낸다. 전류 지령 추종을 위한 제어기로는 전향 제어를 포함한 동기좌표계 d-q축 PI 전류 제어기를 사용하였다. 전체적인 제어기의 이득 및 시스템의 제정수는 표 1에 표기하였다.

본 논문에서는 유지보수가 거의 필요 없으며 고효율, 고출력 밀도의 특성을 갖는 영구자석 동기전동기를 추진용 모터로 사용한 전기 보트 추진 시스템을 개발하였다. 또한 기존의 납축 전지 대신 에너지 밀도가 높은 리튬이온 배터리를 추진용 인버터의 직류 전원으로 사용하였다.

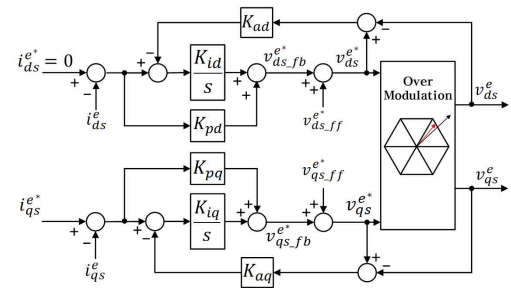


그림 2 동기좌표계 PI제어기를 사용한 전류 제어 블록도

2. 전기 보트 추진 시스템 개발

2.1 추진용 전동기의 속도 제어 시스템

전기 보트는 추진용 전동기에 부착된 프로펠러가 회전하면서 발생하는 추력으로 인해 가속 및 감속되며 프로펠러의 추력은 프로펠러 회전속도의 함수로 표현된다. 따라서 전기 보트의 운항 속도를 제어하기 위해 프로펠러가 부착된 전동기의 회전 속도를 제어할 필요가 있다.

2.2 외란 토크 관측기 설계

수중에서 회전하는 프로펠러는 물의 흐름으로 인해 발생하는 외란 토크의 영향을 받는다. 이로 인한 속도 제어 성능 저하를 막기 위해 외란 토크 관측기를 설계하고, 관측된 외란 토크 성분을 속도 제어기 출력에 보상하였다. 외란 토크 관측기를 설계하기 위해 우선 기계시스템에 대한 모델링이 필요하다. 프로펠러와 같은 팬 부하는 회전속도의 제곱에 비례하는 토크 특성을 가지므로 프로펠러 구동을 위한 기계시스템의 운동방정식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.^[2]

그림 1은 전동기의 속도 지령을 추종하기 위한 제어 블록을 나타낸다. 속도 제어기로 PI(Propotional and Integral) 제어기

$$T_e = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} + A\omega_{rm}^2 + T_d \quad (1)$$

식(1)은 ω_{rm}^2 성분이 포함된 비선형 방정식이므로, 외란 관측기를 설계하기 위해 먼저 이를 선형화 시켜야 한다. 식(1)을 동작점 ω_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 β 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.

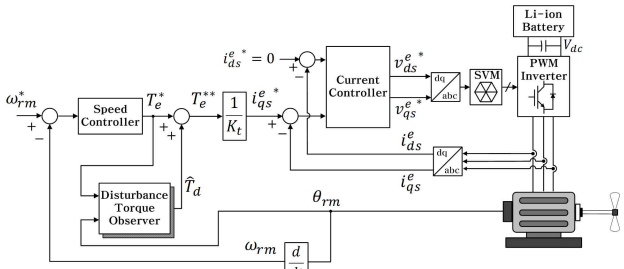


그림 3 외란 관측기가 포함된 속도 제어 시스템

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.

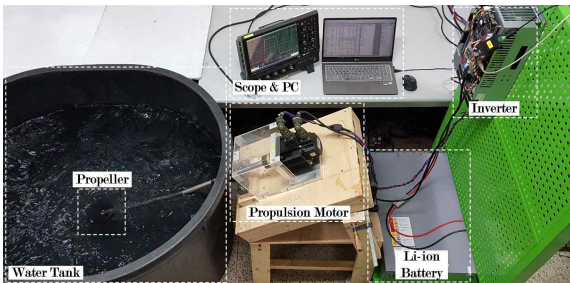


그림 4 전기 보트 추진을 위한 SPMSM 구동 시스템

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.

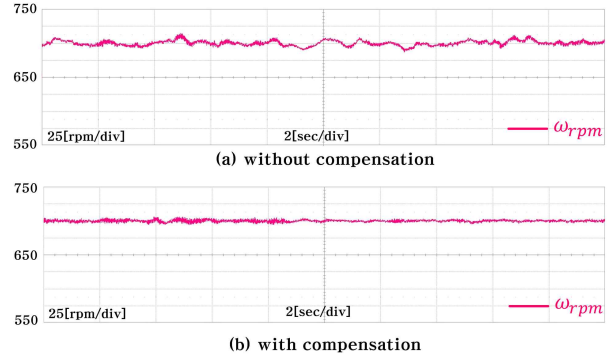


그림 5 외란 토크 보상 전, 후의 속도 파형 (속도지령:700r/min)

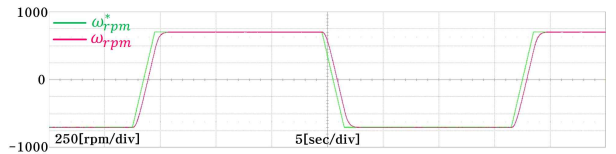


그림 6 정,역방향 속도 제어 실험 결과

표 1 제어기 이득 및 시스템 파라미터

Speed controller gain		Mechanical parameter	
ω_{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
ω_{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 Ω
K_{aq}	$1 / K_{pq}$	L_s	7.5 mH
β	-10	λ_{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.