

센서리스 제어방식 IPMSM 팬 모터의 홀센서를 이용한 중·고속 재기동 성능개선

Improvement of Middle or High Speed Restart Performance Using Hall Sensor for the Sensorlessly Controlled IPMSM Fan motor

이주효* · 정영석**†

J. H. Lee* and Y. S. Jung**†

(접수일 : 2012년 03월 12일, 수정일 : 2012년 09월 12일, 채택확정 : 2012년 10월 05일)

Key Words : Sensorless Control(센서리스제어), Fan Motor(팬모터), Middle or High Speed Restart(중·고속 재기동)

Abstract : This paper investigates the restart performance of sensorlessly controlled IPMSM Fan motor free-running in middle or high speed range just after inverter power off. There could be some difficulties to extract exact position information by using conventional sensorless control for restarting the motor because of stopped inverter operation. To solve this problem, we proposes to use low cost hall sensor. Using a hall sensor with SMO (Sliding Mode Observer) give us a solution to facilitate rotor position information extraction. The algorithm in this paper shows a certain way of the restarting method.

1. 서 론

최근 들어 석유에너지 자원의 고갈문제, 대기 환경 오염문제 등으로 고효율, 고연비, 친환경 자동차에 대한 관심이 증대되고 있다. 전기에너지를 이용하는 전기자동차 또는 하이브리드 자동차는 이들 중 하나이다. 전기자동차/하이브리드 자동차는 고전압 배터리를 사용하고 있으며 각종 전기장치들이 사용되고 있다. 기존의 12V를 이용하는 자동차보다 고전압 전원을 이용한 모터 구동시스템은 더욱 고효율 설계가 가능하여 그 응용이 증대될 것으로 기대된다.

전기자동차/하이브리드 자동차에서 IPMSM (Interior permanent magnet synchronous motor)의 응용은 크게 증대되고 있다. 특히 회전자 위치센서를 사용하지 않는 센서리스제어 기법을 적용한 사례도 증가하고 있다.^(1~7) 냉각팬의 경우 기존의 사다리꼴 역기전력을 가진 BLDC모터 응용에서 정현파 역기전력을

가진 PMSM 응용으로 점차 바뀌어 가고 있다. BLDC모터 구동에서는 회전자 위치정보를 얻기 위해 홀센서를 사용하였으나 정현파 제어를 위해 엔코더 등의 보다 정밀한 위치정보를 얻을 수 있는 센서가 사용되어야 한다.^{1,6)} 홀센서를 이용하여 IPMSM을 구동할 수 있으나 정밀한 회전자 위치 정보를 얻기 위해 추가적인 연산 수행이 필요하며, 제품별 홀센서 오차에 대한 보정이 필요해 양산적용을 위해서는 특별한 관리가 필요하다. 이 문제를 해소하기 위해 센서리스제어를 냉각팬 모터 제어에 응용할 수 있다. 특히 논문 [5]에서 d축과 q축 인덕턴스 값이 다른 IPMSM에 기존의 SMO를 적용하기 어려웠던 문제를 해결하여 IPMSM의 구동에 성공적으로 적용하였다. 그러나 인버터가 구동되지 않는 상황(구동 중 모터 정지를 위해 인버터에 제어 신호를 인가하지 않는 상황)에서 회전자가 회전하고 있을 경우 모터 권선에 전류가 흐르지 않아 SMO가 역기전력을 추정

**† 정영석(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : yousjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6165
*이주효 : 부경대학교 대학원

**† Y. S. Jung(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.
E-mail : yousjung@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6165
*J. H. Lee : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University..

할 수 없어 회전자 위치 정보를 제대로 얻지 못하여 구동 실패하는 경우가 발생하게 된다.²⁾

따라서 본 논문에서는 차량용 냉각팬에 사용되는 IPMSM을 대상으로 센서리스 제어를 설계하고 중속 또는 고속(정격 속도의 10% 이상)에서 인버터가 정지된 상태에서도 재기동이 가능하도록 홀센서를 부가적으로 사용하여 바로 센서리스 제어 방법에 적용하는 방안을 제안한다. 홀센서로부터 60도마다 회전자의 위치정보를 얻고 이를 센서리스제어의 초기값으로 사용하여 큰 과도응답 없이 센서리스 제어에 진입 가능함을 보인다. 특히 이방법은 홀센서 위치정보를 정밀하게 튜닝하지 않아도 되는 이점이 있다. 제안한 방식의 유효성을 검증하기 위해 실험을 행하고 그 결과를 제시한다.

2. SMO(Sliding mode observer)를 이용한 센서리스 제어기

2.1 IPMSM 모델링

2.1.1 IPMSM의 등가 모델

Fig. 1은 2극 IPMSM의 등가 모델을 나타내었다. 고정자는 3상 Y 결선의 권선이며 고정자 권선은 상호 120° 간격으로 감겨져 있다. 고정자 권선은 a,b,c로 표시되어 있으며 직축 d축과 횡축 q축으로 나눈다.

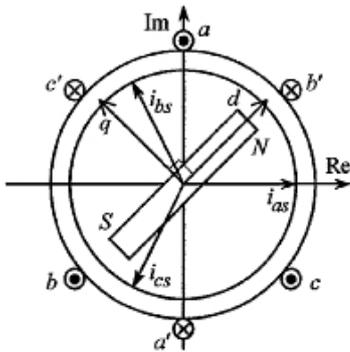


Fig. 1 Equivalent model of IPMSM

Fig. 1에서 고정자 권선에 흐르는 전류를 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} 라고 하고 이들은 120°의 위상차를 가진다.

2.1.2 IPMSM의 전압 방정식

일반적으로 IPMSM의 3상 고정자 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_{as} = R_s i_{as}(t) + \frac{d\lambda_{as}(t)}{dt}$$

$$v_{bs} = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\lambda_{bs}(t)}{dt} \quad (1)$$

$$v_{cs} = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\lambda_{cs}(t)}{dt}$$

여기서, v_{as}, v_{bs}, v_{cs} : 3상 고정자 전압

R_s : 고정자 저항

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : 3상 고정자 전류

$\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs}$: 고정자 자속

식(1)의 IPMSM의 3상 고정자 전압방정식을 2상 동기좌표계의 전압방정식으로 좌표 변환하면 아래의 식(2)와 같이 나타낼수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -wL_q \\ wL_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w\psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서, w : 전기 각속도

i_d, i_q : d, q축 전기자 전류

v_d, v_q : d, q축 터미널 전압

L_d, L_q : d, q축 인덕턴스

ψ_a : 쇄교자속

을 각각 나타낸다.³⁾

2.2 SMO 센서리스 알고리즘

본 절에서는 본 논문에서 적용한 역기전력 추정방식을 SMO 알고리즘에 대해 간단히 기술한다. Fig. 1에서 보여지는 d, q축은 회전자의 위치를 정확히 알 수 있는 경우의 기준 축이다. 하지만 회전자 위치센서를 사용하지 않는 센서리스 알고리즘에서는 정확한 회전자의 위치정보를 알아낼 수가 없으므로 가상의 축 γ, δ 축을 가정한다. 가상의 축에서 얻은 관측기 정보를 바탕으로 정확한 회전자 위치를 추정하게 된다. 식 (2)를 γ, δ 축으로 변환하기 위해 다음의 식(3)으로 나타낸다. ^{4,5)}

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -wL_q \\ wL_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ex} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E_{ex} = w[(L_d - L_q)i_d + \psi_a] - (L_d - L_q)(\pi_q) \quad (4)$$

회전변환에 의해 식(3)는 다음과 같이 $\gamma - \delta$ 축으로 표현 된다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -wL_q \\ wL_q & R_a + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} - (\hat{w} - w) L_d \begin{bmatrix} i_\delta \\ -i_\gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $\theta_e = \theta_1 - \hat{\theta}_1$ 이며, $\hat{\theta}_1$ 과 \hat{w} 는 추정위치와 추정속도를 나타낸다. 슬라이딩 모드 관측기를 설계하기 위해 위에서 구한 IPMSM 모델 식을 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$L_d \begin{bmatrix} p i_\gamma \\ p i_\delta \end{bmatrix} = -R_a \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} + w L_q \begin{bmatrix} i_\delta \\ -i_\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 식으로부터 회전자 위치 정보가 포함된 역기전력을 얻을 수 있는 관측기는 다음과 같다.

$$L_d \begin{bmatrix} p \hat{i}_\gamma \\ p \hat{i}_\delta \end{bmatrix} = -R_a \begin{bmatrix} \hat{i}_\gamma \\ \hat{i}_\delta \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} \text{sign}(\hat{i}_\gamma - i_\gamma) \\ \text{sign}(\hat{i}_\delta - i_\delta) \end{bmatrix} + \hat{w} L_q \begin{bmatrix} i_\delta \\ -i_\gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $\hat{i}_\gamma, \hat{i}_\delta$ 는 추정전류, k 는 관측기 이득을 의미한다. 식(7)에서 식(8)을 뺀 오차 함수는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$L_d \begin{bmatrix} p \bar{i}_\gamma \\ p \bar{i}_\delta \end{bmatrix} = -R_a \begin{bmatrix} \bar{i}_\gamma \\ \bar{i}_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} \text{sign}(\bar{i}_\gamma) \\ \text{sign}(\bar{i}_\delta) \end{bmatrix} + (\hat{w} - w) L_q \begin{bmatrix} i_\delta \\ -i_\gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $\bar{i}_\gamma, \bar{i}_\delta$ 는 추정 오차를 나타낸다. 관측기에 의해 전류오차가 0이 되었다면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Z \equiv k \begin{bmatrix} \text{sign}(\bar{i}_\gamma) \\ \text{sign}(\bar{i}_\delta) \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} + (\hat{w} - w) (L_q - L_d) \begin{bmatrix} i_\delta \\ -i_\gamma \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 Z 는 스위칭 신호를 의미하며, 이 식에서 고주파 스위칭 성분을 제외한 저주파 성분만을 고려한다. 회전자의 회전속도와 추정속도가 근사적으로 작다고 하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} \tilde{Z}_\gamma \\ \tilde{Z}_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(11) 으로부터 회전자의 위치오차는 다음 식(12) 과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_e = -\tan^{-1} \left(\frac{\tilde{Z}_\gamma}{\tilde{Z}_\delta} \right) \quad (12)$$

식 (12)는 다음의 Fig. 2와 같은 관계로 나타낼 수 있으며, 이로부터 회전자 위치 오차 정보로 회전자 위치 정보를 얻을 수 있다.

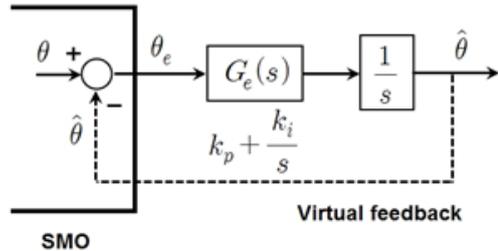


Fig. 2 Obtaining estimated rotor position from rotor position error signal

수식 전개에 대한 보다 자세한 사항은 논문 [5]을 참조하기 바란다.

3. 고속 재기동 성능개선

3.1 홀 센서 신호에 따른 회전자 위치

홀센서의 신호를 이용하여 모터 회전자 위치정보를 어느 정도 얻을 수 있다. 홀센서에서 얻을 수 있는 회전자 위치정보는 센서출력 신호가 바뀌는 순간이며 이는 전기각으로 1회전에 6번 발생한다. 표 1은 홀센서 신호가 매 60도 마다 발생한다고 가정하였을 때의 홀신호 출력과 회전자의 위치 관계를 나타낸 것이다. 모터 제조과정에서 홀센서의 위치는 어느 정도 오차를 가질 수 있 수 있어 정밀한 제어를 위해서는 홀신호의 위치정보는 프로그램에서 보정해 사용해야 할 필요가 있다.

Table 1 Hall signal and rotor position

Hall signal (Signal inversion)	Rotor position
001 (110)	-30° ~ 30°
101 (010)	30° ~ 90°
100 (011)	90° ~ 150°
110 (001)	150° ~ 210°
010 (101)	210° ~ 270°
011 (100)	270° ~ -30°

3.2 제안된 알고리즘

고가의 회전자 위치센서를 사용하지 않고 또는 저가의 회전자 위치센서의 복잡한 계산 및 보정을 하지 않으려면 센서리스 제어방식을 사용할 필요가 있다. 본 논문에서 사용하는 SMO방식 센서리스 제어기는 역기전력을 추정하는 방식이므로 저속 구간에서 성능을 제대로 낼 수 없으며, 인버터가 정지된 상태에서는 특히 회전자 위치정보를 얻을 수 없다. 팬 모터는 중속 또는 고속으로 회전 중이나 인버터는 정지된 상태의 경우는 팬이 고속운전하다 정지 명령에 의해 발생하거나 차량이 고속으로 주행할 때 발생할 수 있다. 이런 상황에서도 안정적인 센서리스제어를 위해서 본 논문에서는 대략적인 위치정보를 얻을 수 있는 홀센서를 부가적으로 사용하였다. 홀센서는 정밀한 위치정보를 내어 줄 필요가 없어 부가적인 계산이나 보정이 필요하지 않다. Fig. 3은 제안한 방식의 블록선도를 나타낸 것이다. 인버터가 정지된 상태에서 재기동을 위해서 홀센서로부터 입력을 기다리며, 홀센서 신호가 입력되면 해당하는 회전자 위치 정보와 회전속도를 SMO의 초기값으로 설정한다. 설정된 초기값에서 바로 관측기가 작동되며 안정적인 구동이 이루어진다.

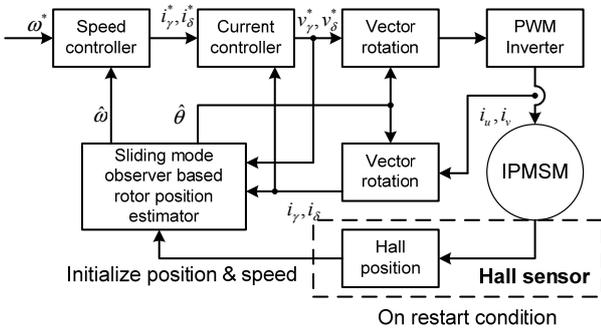


Fig. 3 Block diagram of the proposed algorithm

Table 2 Parameters of tested IPMSM

Number of pole-pairs	4
Rated speed	4200RPM
DC link voltage	288V
Armature resistance Ra	0.496
d-axes inductance Ld	2.05mH
q-axes inductance Lq	3.65mH

4. 실험 결과

본 논문에서 제시한 알고리즘은 제작한 인버터와

팬 모터에 적용하여 그 유효성을 검증하였다. 표 2는 사용된 모터의 파라미터를 나타낸다. Fig. 4와 Fig. 5는 IPMSM 팬모터의 재기동시 초기 속도 정보와 초기 위치 정보의 오차가 각각 SMO 센서리스 제어에 미치는 영향을 알아보기 위해 나타낸 것이다. Fig. 4는 회전자의 초기 속도 정보에 큰 오차가 있을 경우이며, Fig. 5는 초기 회전자 위치 정보 오차가 큰 경우이다. 각 그림에서 제일 위의 파형은 속도 정보를 아래의 파형은 각각 홀 신호와 SMO에 의한 회전자 위치 정보를 나타낸 것이다.

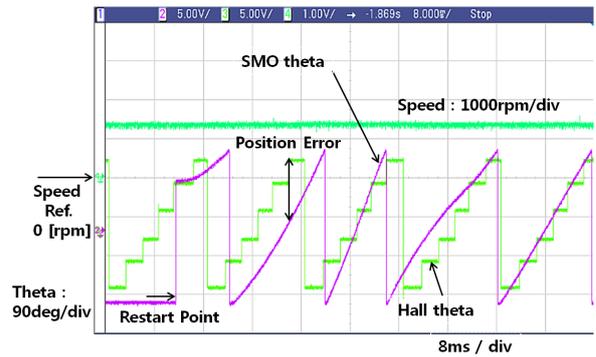


Fig. 4. Experimental results when initial speed error exists: speed(upper, 1000[rpm]/div), hall theta(staircase line), SMO theta

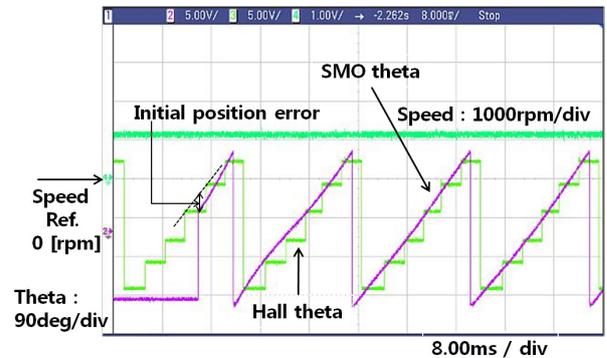


Fig. 5. Experimental results when initial position error(about 40 degree) exists: speed(upper, 1000[rpm]/div), hall theta(staircase line), SMO theta

Fig. 4는 SMO의 초기 속도 정보를 “0”으로 설정한 경우를 나타내며 이 경우 SMO에 의한 회전자 위치 추정 값이 약 90도 이상 오차를 나타낼 수 있다. 경우에 따라 재기동이 불가능한 경우도 발생한다. Fig. 5는 속도 정보는 맞지만 회전자의 초기 위치 정보 오류가 약 40도 있을 때 나타나는 파형이다. 그림을 보면 SMO의 초기의 회전자 위치 추정이 불

안정하고 위치 추정이 속도 정보 오류 시(Fig. 4) 나타나는 현상보다 안정되긴 하지만 여전히 재기동 후 초기 회전자의 위치가 직선적으로 증가 하지 않고 있음을 알 수 있다.

그림 Fig. 6에서는 홀센서의 신호를 이용하여 회전자의 위치 정보 및 속도 정보를 재기동시 초기값으로 사용하였을 때의 실험 결과를 보인다. Fig. 6의 경우는 고속영역에서 인버터를 정지시킨 후 약 1.5초 후 재기동 시켰을 시의 파형을 나타내며, 회전속도(위), 홀센서에 의한 위치정보, SMO 추정 위치정보를 나타내고 있다. 그림 Fig. 7은 그림 6에서 재기동이 일어나는 부분을 확대한 것이다. 초기 회전자 위치정보와 속도정보에 오차가 있을 때의 응답에 비해 상당히 안정적인 회전자 위치 추정이 이루어지고 있음을 확인 할 수 있다.

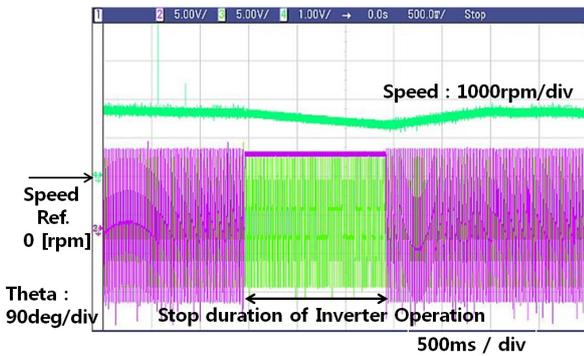


Fig. 6. Experimental results when Fan motor is restarting: speed(upper, 1000[rpm]/div), hall theta, SMO theta

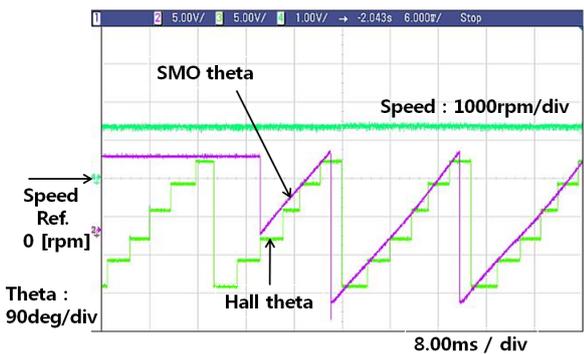


Fig. 7. Experimental results when initial position and speed informations are used: speed(upper, 1000[rpm]/div), hall theta(staircase line), SMO theta

이상의 결과로부터 역기전력을 이용하는 SMO 방식 센서리스 알고리즘에서 회전자 회전 중 재기동의

안정성을 높이기 위해서는 회전자의 초기 위치 정보 뿐만 아니라 초기 속도 정보도 중요함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 차량용 냉각팬에 사용되는 IPMSM을 대상으로 SMO방식 센서리스 제어를 설계하고 중속 또는 고속에서 인버터가 정지된 상태에서도 재기동이 가능하도록 홀센서를 부가적으로 사용하는 제어 방법을 실험을 통해 검증하였다. 홀센서로부터 정밀한 위치정보가 아닌 대략 60° 구간 마다의 회전자 위치정보 및 속도정보만으로도 센서리스제어의 초기값으로 사용하여 큰 과도응답 없이 센서리스 제어로의 안정적 진입이 이루어짐을 보였다. 이로 인해 중속 또는 고속 영역에서의 재기동시 위치 추정의 어려움을 해결하였고, 홀 신호의 대략적인 위치 정보만을 이용해 연산 수행의 복잡함을 간략화 하였다. 제안된 방식의 성능은 실험을 통해 확인하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 2단계 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Y. S. Han, J. S. Choi, and Y. S. Kim, 2000, "Sensorless PMSM drive with a sliding mode control based adaptive speed and stator resistance estimator", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 36, pp. 3588-3591.
2. J. I. Ha, K. Ide, T. Sawa, and S. K. Sul, 2003, "Sensorless rotor position estimation of an interior permanent-magnet motor from initial states", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 39, No. 3, pp. 761-767.
3. S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, 2005 "Mechanical sensorless drives of IPMSM with online parameter identification", IEEE IAS., vol. 1, pp. 297-303.
4. K. L. Kang, 2004, "A Study on Sensorless Control of a PMSM using Sliding Mode Observer in High Speed Range", The Journal of the Korean Institute of electrical Engineers, Vol.

53B, No. 1, pp. 30-36.

5. Y. S. Jung, M. G. Kim, 2009, "Sliding Mode Observer for Sensorless Control of IPMSM Drives", Journal of Power Electronics, Vol. 9, No. 1, pp. 117-123.
6. T. Y. Jeong and S. K. Jeong, 2011, "Comparison analysis on efficiency and operating characteristic between induction and BLDC motor according to the load variation based on battery power source for electric propulsion system of small ships", Journal of KSPSE, vol. 15, no. 2, pp. 78-83.
7. R. W. Park and S. Cho, "Design of a bilinear robust controller for a hydrostatic driver", Journal of KSPSE, vol. 15, no. 4, pp. 65-74.