

마이크로컨트롤러를 이용한 BLDC 모터 구동 Hardware-in-the-Loop Simulator 개발

Development of a Hardware-in-the-Loop Simulator for BLDC Motor Driving Using Microcontroller

조 봉 언, 이 영 삼* 
(BongEon Jo¹ and Young Sam Lee^{1,*})

¹Department of Electrical Engineering, Inha University

Abstract: In this paper, we deal with the development of a HIL (Hardware-in-the-Loop) simulator for BLDC motor driving using a microcontroller. We propose a modified BLDC model for the simulation of a BLDC motor using a microcontroller. The proposed HIL simulator is developed using various peripherals of STM32F407 (ARM cortex-M4 based microcontroller). The proposed HIL simulator consists of three parts. First, the part simulating the inverter analyzes the input PWM signals to calculate the corresponding input voltage. This part detects wrong PWM signals or shoot-throughs of the half-bridge. Second, the BLDC motor part is implemented by solving the modified model equations in real time. Finally, the third part generates the output of the BLDC motor. The HIL simulator generates the Back Electromotive Force (BEMF) waveform and signals of a rotary encoder and a hall sensor. Sensor signals are generated using a timer interrupt. The BEMF waveform is implemented using DAC. Moreover, a generation method using PWM and RC filter is presented. Through experiments, we illustrate that the developed HIL simulator accurately simulates the BLDC motor. Furthermore, we confirm that the BLDC motor drive algorithm designed with the developed HIL simulator can be successfully applied to real BLDC motor driving systems.

Keywords: BLDC motor drive, BLDC motor simulation, HIL simulator, microcontroller

I. 서론

최근 공학교육은 전공 지식뿐만 아니라 실무능력을 갖춘 인재양성에 힘을 쓰고 있다. 학생들에게 필요한 문제 해결 능력, 의사 소통능력 등과 같은 실무능력을 키워주기 위한 실험·설계 수업이 포함된 교과과정이 증가하고 있다. 이러한 교과과정이 효과적인 성과를 얻기 위해서는 실습에 필요한 장비의 지원이 필요하다. 자동제어와 관련된 교과목에서는 이론적으로 배운 제어이론을 적용하기 위한 플랜트, 제어기, 전원장치 등과 같은 실습 장비들이 필요하다. 실습자의 미숙한 조작으로 인하여 실습 장비의 파손 뿐 만 아니라 실습자의 부상도 있을 수 있다. 이러한 안전과 관련된 문제를 해결하고 더불어 고가의 실습 장비를 대체할 수 있는 저렴한 실습 장비의 필요성이 있다.

HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)는 하드웨어 시스템의 물리적인 부분을 모의실험으로 대체하는 것을 의미한다 [1]. HILS는 대상이 되는 시스템의 특성을 동일하게 모사하여 시뮬레이션을 한다. HILS를 통한 시스템의 개발은 시간과 비용을 줄일 뿐만 아니라 실험 중에 나타날 수 있는 위험성을 줄이는데 도움을 준다. HILS는 자동차, 항공우주, 전력 등과 같은 여러 분야에서 시스템의 검증과 개발에 사

용된다[2-4]. 또한 교육의 효과를 높이기 위한 실습 장비로 활용하는 연구가 있다[5]. HIL 시뮬레이터를 이용한 교육용 실습 장비를 개발하면 장비 사용에 있어 고장이나 안전사고에 대한 걱정이 사라진다. 또한 실제 시스템과 동일한 환경의 모의실험이기 때문에 실제 시스템을 통한 교육과 유사한 교육효과를 기대할 수 있다.

최근 BLDC 모터는 RC 뿐만 아니라 가전제품, 엘리베이터, 전동 키포드와 같은 원동기 그리고 전기자동차 까지 여러 분야에서 널리 쓰이고 있다. BLDC 모터를 구동하기 위해서는 전류를 흘려주는 권선을 회전자에 위치에 따라 바꿔 주는 외부의 구동회로가 필요하다. BLDC 모터 구동 시스템을 Matlab으로 시뮬레이션 하는 연구들이 있다[6,7]. 시뮬레이션을 통해 BLDC 모터의 전류-토크 특성, 토크 리플 등과 같은 특성을 연구하고 제어알고리즘 설계에 이용한다. 하지만 Matlab을 이용한 연구들은 실시간 시뮬레이션이 불가능하다. BLDC 모터 구동의 실시간 시뮬레이션을 위하여 FPGA 혹은 CPU를 이용하는 연구들이 진행되었다[8,9,10]. 해당 연구들은 고가의 FPGA 보드를 이용하거나 전용프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행한다.

작성자는 BLDC 모터를 구동하고 속도제어를 수행하는

*Corresponding Author

Manuscript received September 10, 2018; revised October 31, 2018; accepted November 9, 2018

조봉언, 이영삼: 인하대학교 전기공학과(jbw0803@gmail.com, lys@inha.ac.kr,  0000-0003-0665-1464)

※ 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1D1A1B03029578).

설계수업을 진행하였다. 수업을 진행하는 동안 8개의 조 가운데 절반이 넘는 6개의 조에서 인버터를 파손시켰다. 두 조에서는 동일한 실수로 인하여 인버터가 손상되는 일이 발생하기도 하였다. 이를 통해 BLDC 모터를 구동을 모사할 수 있는 시뮬레이터의 필요성을 느꼈다. 본 논문에서는 마이크로컨트롤러를 이용하여 BLDC 모터의 구동시스템에 대한 HIL 시뮬레이터를 구현하여 저렴한 가격으로 고장 안전에 대한 걱정 없이 BLDC 모터를 구동하기 위한 제어기 설계과정을 교육할 수 있는 장비를 개발하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 II절에서는 HIL 시뮬레이터에서 동작하는 BLDC 모터의 모델방정식을 구한다. 다음으로 III절에서는 마이크로컨트롤러를 이용한 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터의 구현을 제안한다. IV절에서는 개발한 HIL 시뮬레이터의 실험을 진행하여 제어기를 설계한다. 최종적으로 V장에서 결론을 제시한다.

II. BLDC 모터 모델링

BLDC 모터는 영구자석으로 이루어진 회전자의 위치에 따라 특정 권선에 전류를 흘려주어야 최대 토크를 발생하면서 회전한다. 일반적으로 회전자의 위치를 검출하기 위해 홀 센서를 사용한다. BLDC모터의 권선에 전류를 흘려주기 위하여 인버터를 사용한다. 그림 1은 3 하프 브릿지 인버터를 이용한 3상 Y결선의 BLDC 모터를 구동하기 위한 시스템이다.

1. BLDC 모터의 모델링

그림 2와 같은 3상 2극의 BLDC 모터를 가정하면 다음과 같은 전압방정식을 얻을 수 있다[11].

$$\begin{aligned} u_a &= R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_b &= R_s i_b + L_s \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_c &= R_s i_c + L_s \frac{di_c}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 u 는 상전압, i 는 전류, e 는 역기전력을 뜻하고 점자 a, b, c 는 BLDC 모터의 각 권선을 나타낸다. R_s 과 L_s 은 BLDC 모터 권선의 저항과 인덕턴스를 나타낸다. 영구자석에 의한 역기전력 e 와 모터가 발생하는 토크 T_e 는 각

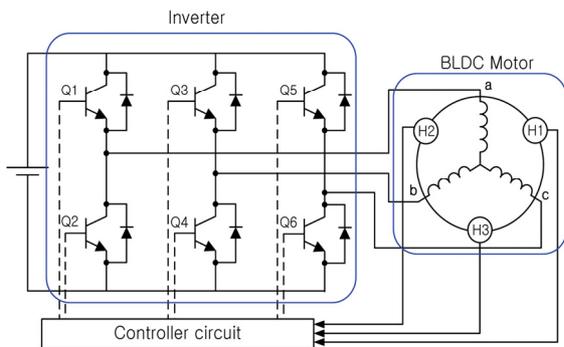


그림 1. BLDC 모터 구동 시스템.

Fig. 1. BLDC motor driving system.

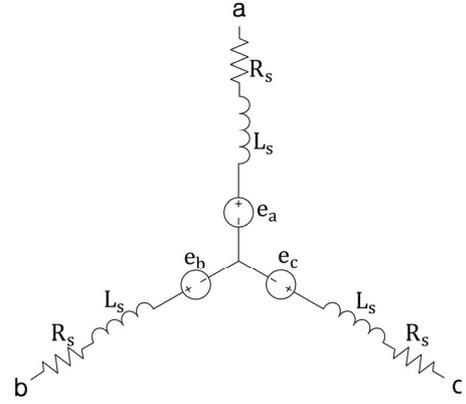


그림 2. BLDC 모터의 등가회로.

Fig. 2. Equivalent circuit of a BLDC motor.

각 식 (2)와 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \\ e_b &= \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c &= \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \\ &= \frac{k_t}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) i_b + F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) i_c \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_e}{dt} = p\omega_m \quad (4)$$

여기에서 k_e 는 역기전력 상수이며, k_t 는 토크 상수이다. MKS단위계에서 이 두 상수는 같은 값을 가진다. ω_m 은 기계적 각속도이고 θ_e 는 전기각을 나타낸다. p 는 BLDC 모터의 회전자의 자극쌍의 수를 나타낸다. $F(\theta_e)$ 는 역기전력을 표현하기 위한 단위함수로 회전자의 위치에 대한 함수이다. $F(\theta_e)$ 는 식 (5)와 같다.

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 6\theta_r/\pi & (0 \leq \theta_r < \pi/6) \\ 1 & (\pi/6 \leq \theta_r < 5\pi/6) \\ -6\theta_r/\pi & (5\pi/6 \leq \theta_r < 7\pi/6) \\ -1 & (7\pi/6 \leq \theta_r < 11\pi/6) \\ 6\theta_r/\pi - 12 & (11\pi/6 \leq \theta_r < 2\pi) \end{cases} \quad (5)$$

BLDC 모터가 가지는 기계시스템의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (6)$$

여기에서 T_L 은 부하토크, J 는 관성모멘트이며 B 는 마찰계수이다.

위에서 구한 모델방정식을 이용하여 BLDC 모터를 시뮬레이션하기 위해서는 짧은 샘플시간이 필요하다. 많은 양의 연산이 필요하기 때문에 연산능력이 뛰어난 컴퓨터를 이용

하더라도 시뮬레이션에 오랜 시간이 소모된다. 따라서 본 논문에서 구현하고자하는 마이크로컨트롤러를 이용한 HIL 시뮬레이터에서는 일반적인 BLDC의 모델방정식을 이용할 수 없다.

2. 수정된 BLDC 모터의 모델링

BLDC 모터를 구동하는 동안 전류는 3상의 권선 중 항상 2상에 흐른다. 이 구조는 그림 3과 같은 등가회로를 이용하여 나타낼 수 있다[12]. 등가회로에서 볼 수 있듯이 수정된 BLDC 모터는 DC 모터의 일종으로 볼 수 있다.

그림 3의 등가회로의 모터를 모델링하면 다음과 같다.

$$u_d = 2R_s i_s + 2L_s \frac{di_s}{dt} + 2e_f \quad (7)$$

$$e_f = k_f \omega_m \quad (8)$$

$$T_e = 2k_f i_s \quad (9)$$

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (10)$$

여기에서 u_d 는 인가하는 전압, e_f 는 역기전력을 의미한다. k_f 는 수정된 모델의 역기전력상수로 사다리꼴 모양의 BLDC 모터의 역기전력의 평편한 부분과 같은 값으로 다음 관계를 만족한다.

$$k_f = \frac{k_e}{2} \quad (11)$$

3. 시뮬레이션

MATLAB/Simulink를 이용해 수정된 BLDC 모터의 모델링을 검증하기 위한 시뮬레이션을 한다. 시뮬레이션에서 사용한 모터는 Maxon 사의 200W, EC-4pole 30 (305014)이다. 표 1은 사용한 BLDC 모터의 스펙을 보여준다.

그림 1에서와 같이 BLDC 모터를 구동하기 위한 시스템은 인버터와 BLDC 모터로 구성되어 있다. BLDC 모터의 구동을 시뮬레이션하기 위하여 그림 4와 같이 Simulink 모델을 구성한다[8]. 식 (1) - (6)을 이용하여 BLDC 모터 블록을 구성하고, 인버터에 해당하는 블록은 S-Function을 사용한다. S-function은 사용자 정의블록을 기술하기 위한 Matlab에서 제공하는 기술(description)언어이다. 이 논문에서는 C언어 기반의 S-function을 사용한다. 인버터에 인가되는 PWM 신호는 100% 듀티비를 가정하고 BLDC를 구동하는 시뮬레이션을 수행한다.

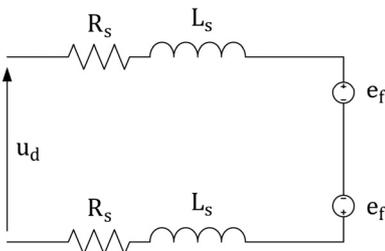


그림 3. 수정된 BLDC 모터의 등가회로.

Fig. 3. Equivalent circuit of modified BLDC motor.

표 1. 사용된 BLDC 모터의 정보.

Table 1. Data of the used BLDC motor.

Parameter	Value
자극 수 (P)	4
정격 전압	36 [V]
무부하 속도	16700 [rpm]
무부하 전류	485 [mA]
스톨 토크	3510 [mNm]
스톨 전류	171 [A]
R_s	0.105 [Ω]
L_s	0.0185 [mH]
k_t	20.5 [mNm/A]
J	33.3 [gcm ²]
B (추정값)	$5.68 \cdot 10^{-6}$ [Nm·s]

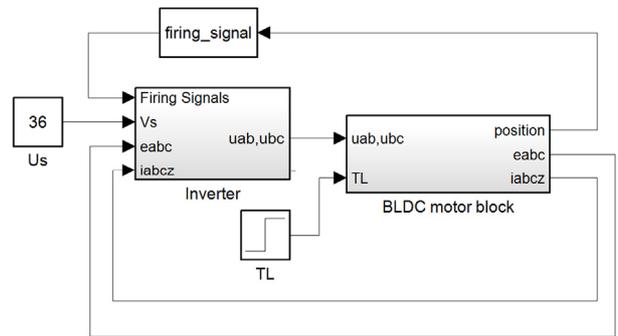


그림 4. BLDC 모터 구동에 대한 Simulink 모델.

Fig. 4. Simulink model for BLDC motor driving.

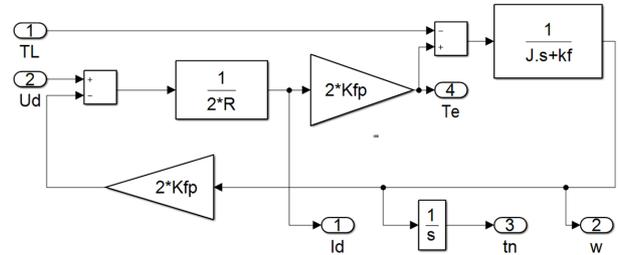


그림 5. 수정된 BLDC 모터 Simulink 모델.

Fig. 5. Simulink model for modified BLDC motor.

그림 5는 수정된 BLDC 모터의 모델방정식을 이용하여 BLDC 모터를 시뮬레이션하기 위한 Simulink 모델이다. 시뮬레이션을 위하여 식 (7) - (10)을 이용하여 만든 모델로 일반적인 DC 모터의 시뮬레이션 모델과 유사한 형태를 가지고 있다. L_s 는 전자회로에서 미치는 영향이 적은 것으로 간주하고 무시하였다. 마찬가지로 on/off 방식의 신호로 전압을 인가하는 시뮬레이션을 한다.

그림 4의 BLDC 모터 모델은 $0.5\mu\text{sec}$ 의 샘플 시간으로 시뮬레이션을 진행한다. 샘플링 시간은 BLDC 모터의 구동을 모사할 수 있는 최대의 시간으로 샘플 시간이 더 길어지면 제대로 된 시뮬레이션을 할 수 없다. BLDC 모터의

표 2. 실험용 컴퓨터의 사양.

Table 2. Specification of computer for simulation.

CPU	Intel i7-4770
RAM	8 GB
OS	Win 7, 64bit
Program	Matlab R2016a

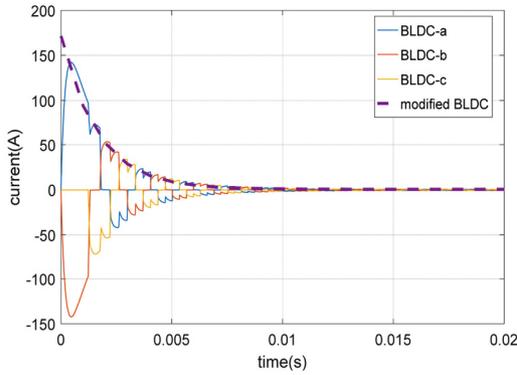


그림 6. BLDC 모터와 수정된 BLDC 모터의 시뮬레이션 결과 : 전류.

Fig. 6. Simulation results of BLDC motor and modified BLDC motor : current.

구동을 시뮬레이션하는 그림 4의 모델을 0.05초 동안 시뮬레이션 하는데 약 1.8초가 걸린다. 시뮬레이션에 사용한 컴퓨터의 사양은 표 2와 같다. 시뮬레이션에 사용한 컴퓨터보다 연산능력이 낮은 마이크로컨트롤러에서 이와 같은 모델방정식을 이용하여 BLDC 모터의 구동을 실시간으로 시뮬레이션하는 것은 적절하지 않다.

그림 5의 수정된 BLDC 모터 모델은 1msec의 샘플 시간으로 진행하였다. 샘플 시간 1msec는 마이크로컨트롤러를 이용하여 HIL 시뮬레이터를 구현할 때 모델방정식을 풀이하는 시간이다. 두 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하여 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터에 수정된 BLDC 모터 모델의 사용 타당성 대한 검증을 한다.

그림 6은 BLDC 모터와 수정된 BLDC 모터의 모델을 이용해 얻은 시뮬레이션 결과 가운데 전류를 나타낸 그래프이다. 총 4개의 그래프 가운데 실선으로 표시된 3개의 그래프는 BLDC 모터의 결과이고 점선으로 표시된 그래프는 수정된 BLDC 모터의 결과이다. BLDC 모터는 commutation이 변경될 때마다 전류의 리플이 나타난다. 수정된 BLDC 모터의 경우 L_s 를 무시하고 시뮬레이션을 진행하여 처음 시작부분의 전류 값이 다르다. 그 때의 전류 값은 171.4A로 표 1의 스톱 전류 값과 일치한다. 일정 시간이 지나고 정상 상태에서 BLDC 모터의 전류의 평균값과 수정된 BLDC 모터의 전류 값이 일치한다. 그 값은 0.48A로 표 1의 무부하 전류 값과 일치한다.

그림 7은 시뮬레이션 결과 가운데 토크를 표시한 그래프이다. 마찬가지로 실선은 BLDC 모터의 결과이고 점선은 수정된 BLDC 모터의 결과이다. 전류와 마찬가지로 commutation이 변경되는 순간마다 리플이 생기는 것을 확인할 수

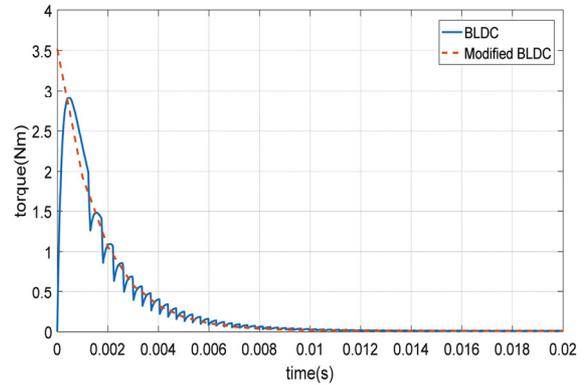


그림 7. BLDC 모터와 수정된 BLDC 모터의 시뮬레이션 결과 : 토크.

Fig. 7. Simulation results of BLDC motor and modified BLDC motor : torque.

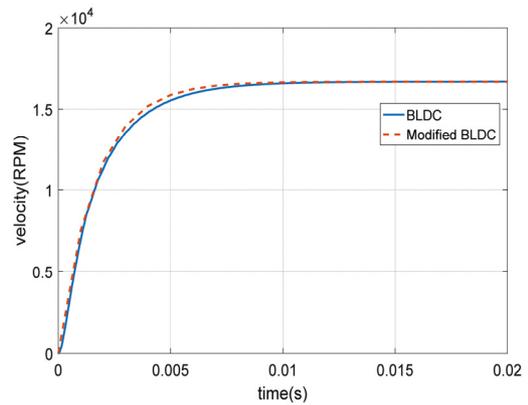


그림 8. BLDC 모터와 수정된 BLDC 모터의 시뮬레이션 결과 : 속도.

Fig. 8. Simulation results of BLDC motor and modified BLDC motor : velocity.

있다. 수정된 BLDC 모터의 결과를 보면 처음에 시작하는 토크가 표 1의 스톱 토크 값인 3.5Nm를 가리킨다. BLDC 모터의 토크가 평균과 수정된 BLDC 모터의 토크곡선이 유사한 값을 가지고 정상상태 값이 동일하다.

그림 8은 속도에 대한 시뮬레이션 결과를 그린 그래프이다. 마찬가지로 실선은 BLDC모터를 점선은 수정된 BLDC 모터의 결과를 나타낸다. 유사한 형태로 속도가 상승하고 정상상태의 값이 표 1의 무부하 속도의 값과 동일한 16700 RPM이 나온다.

시뮬레이션에 사용한 Maxon 사의 EC-4pole 모터의 데이터와 시뮬레이션 결과가 동일하다. 이를 통해 BLDC 모터의 모델링은 타당하다고 볼 수 있다. 또한 수정된 BLDC모터의 모델링은 BLDC 모터의 모델링을 대신하여 HIL 시뮬레이터를 구현하는데 사용할 수 있음을 확인하였다.

III. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터

본 논문에서 제안하는 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터는 실제 시스템의 특성을 실시간으로 정확히 모사할 수 있

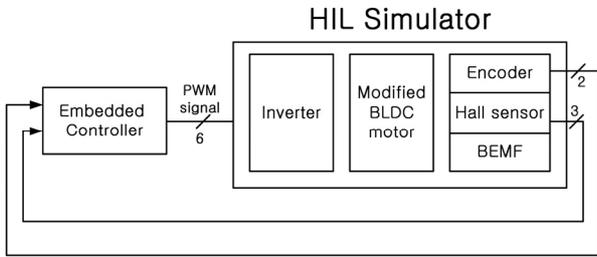


그림 9. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터 구성.
Fig. 9. Configuration of BLDC motor drive HIL Simulator.

표 3. 구성요소별 인터럽트 종류와 우선순위.

Table 3. Interrupt types and priorities by component.

구성요소	인터럽트	
	종류	우선순위
인버터 구현	Input capture interrupt	3
	GPIO External interrupt	2
BLDC 모터 구현	Timer interrupt	4
BLDC 모터 출력	Timer interrupt	1

어야 한다. 이를 위해 그림 9와 같이 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 구성한다. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터는 인버터를 모사하는 부분, BLDC 모터의 모델방정식을 풀이하는 부분 그리고 BLDC 모터의 출력들을 모사하는 부분으로 이루어진다.

BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 구현하기 위하여 Waveshare 사의 Core407V 보드를 사용한다. 이 보드는 ARM Cortex-M4 core를 사용하는 ST Microelectronics 사의 STM32F407 마이크로컨트롤러를 탑재하고 있는 개발보드이다. STM32F407의 모든 IO확장, JTAG/SWD 디버그 인터페이스를 지원한다. STM32F407은 168MHz의 클럭을 이용하여 동작하고 타이머/카운터, DAC(Digital-to-Analog Converter), ADC (Analog-to-Digital Converter), NVIC(Nested Vectored Interrupt Controller)등 여러 주변장치를 가지고 있어 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터 구현에 도움을 준다. 특히 인터럽트의 우선순위를 지정할 수 있는 NVIC 기능은 HIL 시뮬레이터의 개발에 큰 부분을 차지한다. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 구성하는 부분별로 사용하는 인터럽트의 종류와 우선순위는 표 3과 같다. 인터럽트의 우선순위는 구현하고자 기능의 중요도와 인터럽트의 발생 빈도를 기준으로 실험을 통해 설정한다. 정확한 시점에 인터럽트가 일어나지 않은 상황에서 발생하는 BLDC 모터 구동 시스템의 오차에 따라 중요도를 설정한다.

1. 인버터 구현

제안하는 HIL 시뮬레이터에서 인버터를 모사하는 부분에 대한 구현방법을 제시한다. BLDC 모터 구동 시스템에서 인버터는 입력되는 PWM 신호에 따라 BLDC 모터에 지령전압을 인가해 주는 역할을 한다.

BLDC 모터를 구동하기 위하여 홀 센서의 신호에 따라 적절한 신호가 인버터에 인가되어야 한다. 인버터에 인가되는 신호는 스위치를 도통 시키고 스위치를 도통 시키는 방

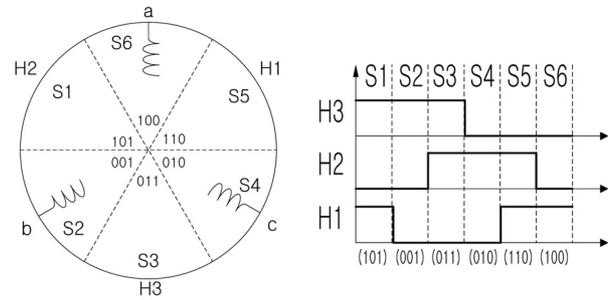


그림 10. 자극 위치에 따른 홀 센서 출력.
Fig. 10. Hall sensor output according to rotor position.

표 4. BLDC 모터의 정류표.

Table 4. Commutation talbe of BLDC motor.

Sector	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
S1 (S4)	PWM	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
S2 (S5)	PWM	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
S3 (S6)	OFF	OFF	PWM	OFF	OFF	ON
S4 (S1)	OFF	ON	PWM	OFF	OFF	OFF
S5 (S2)	OFF	ON	OFF	OFF	PWM	OFF
S6 (S3)	OFF	OFF	OFF	ON	PWM	OFF

법에 따라 유니폴라 스위칭방식, 바이폴라 스위칭 방식이 나뉘게 된다. 본 논문에서는 유니폴라 스위칭 방식 중에 상단 스위치에 PWM 신호를 인가하는 상단 스위치 구동기법을 인버터에 입력하는 것으로 가정한다.

BLDC 모터는 영구자석으로 이루어진 회전자에 따라 그림 10과 같은 홀 센서의 값을 출력한다. 회전자의 위치와 BLDC 모터의 회전방향에 따라 인버터에 입력되는 신호는 표 4와 같다. ‘Sector’ 항목은 BLDC 모터의 회전자 위치하는 공간으로 그림 10에 나타난 위치이다. ‘Sector’ 항목을 기준으로 신호를 입력하면 그림 10의 모터는 반시계 방향으로 회전한다. 괄호 안의 위치는 시계방향으로 모터를 회전시키기 위한 신호이다. ‘Q1’에서 ‘Q6’은 그림 1의 인버터에 표시된 스위치의 번호를 나타낸다. ‘PWM’, ‘ON’ 그리고 ‘OFF’는 각 스위치에 인가되는 신호를 의미한다. 인버터에 입력되는 PWM 신호의 듀티비에 따라 BLDC 모터에 입력되는 전압이 결정되고 이는 식 (12)와 계산할 수 있다.

$$V = \frac{duty}{100} \times V_{DC} \tag{12}$$

BLDC 모터에 입력 전압을 구하기 위해서는 인버터에 입력되는 PWM신호의 듀티비를 알아야 한다. 보통 모터에 인가되는 PWM신호는 가청주파수를 피하기 위하여 15~20 KHz의 주파수를 가진다. 고속의 PWM신호의 듀티비를 측정하기 위하여 STM32F407 마이크로컨트롤러의 주변장치 중 input capture 기능을 사용한다. Input capture 기능은 카운터를 이용해 입력되는 신호의 상승 모서리와 하강 모서리가 일어나는 순간의 카운터 값을 레지스터에 저장한다. 상승 모서리가 입력될 때 인터럽트를 발생시킬 수 있고, 인터럽트를 이용하여 입력되는 PWM 신호의 듀티비와 주기를

측정할 수 있다. Input capture 인터럽트는 하드웨어적으로 카운터의 값이 레지스터에 저장되기 때문에 상대적으로 낮은 우선순위를 부여해도 동작에 무리가 없다.

인버터에 인가되는 신호는 상단 스위치를 구동하는 PWM신호와 하단 스위치를 구동하는 on/off 신호로 구분된다. 하단 스위치에 인가되는 on/off 스위치의 신호는 GPIO 외부 인터럽트 기능을 사용하여 측정한다. 외부 인터럽트는 하단스위치의 신호를 측정하여 하나의 하프 브릿지의 상단, 하단 스위치가 동시에 셧-스루(Shoot-through) 현상을 측정하여야 한다. 셧-스루가 발생한 경우 놓치지 않고 검출하기 위해 상단 스위치의 신호를 측정하는 input capture 인터럽트보다 높은 우선순위를 할당한다. 측정된 하단 스위치의 신호와 input capture 기능으로 측정된 상단 스위치의 신호를 조합하여 BLDC 모터에 입력될 전압을 측정한다.

BLDC 모터의 구동에 대한 이해가 부족하거나 마이크로 컨트롤러의 조작이 미숙한 사람들이 그림 1과 같은 구동 시스템을 이용하여 인버터에 신호를 인가할 때 다음과 같은 실수를 저지룰 수 있다.

첫 번째로, 회전자의 위치에 따른 PWM 신호를 제대로 인가하지 못하는 것이다. 이런 실수는 주로 BLDC 모터의 이해가 부족한 상태에서 일어난다. BLDC 모터는 최대토크를 생성할 수 있도록 회전자의 위치에 인버터에 정확한 신호의 조합을 인가하여야 한다. 올바르게 인가하지 않으면 BLDC 모터가 일정한 토크를 생성하지 못하여 부드럽지 못한 회전을 하게 된다. 이를 확인하기 위하여 PWM 신호와 on/off 신호를 표 3과 비교하여 확인한다. 회전자의 위치는 제안하는 BLDC 모터의 모델방정식을 풀이하여 얻는다.

두 번째로 상단 스위치와 하단 스위치를 동시에 셧-스루 현상을 발생시킨다. 이런 실수는 마이크로컨트롤러의 조작이 미숙할 경우 주로 발생한다. 셧-스루 현상이 나타나게 되면 스위치 부분에 단락 회로가 생성되어 인버터에 심각한 손상과 안전문제를 일으킬 수 있다. 셧-스루 현상을 확인하기 위하여 하나의 하프 브릿지에 상단 스위치에 인가되는 PWM 신호와 하단 스위치에 인가되는 on/off 신호가 동시에 입력되는지 확인한다.

2. BLDC 모터 구현

인버터를 통해 BLDC 모터에 인가되는 전압이 측정되면 이를 통해 BLDC 모터의 모델방정식을 풀이하여 상태방정식을 갱신한다. 식 (7) - (10)의 모델방정식을 1ms 주기의 타이머 인터럽트를 이용하여 풀이한다. Runge-Kutta 4차 미분방정식 해법을 이용하여 모델방정식을 실시간으로 풀이한다. BLDC 모터의 회전속도와 회전각이 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터 구현에 필요하다. 전류와 토크는 BLDC 모터의 구동을 확인하기 위한 정보로 함께 사용한다.

3. BLDC 모터의 출력 구현

BLDC 모터의 구동에 있어서 BLDC 모터에서 출력되는 신호는 엔코더, 홀 센서 그리고 역기전력 신호가 있다. 홀 센서와 엔코더의 신호는 모델방정식의 풀이를 통해 갱신된 회전자의 위치에 따라 직교 위상을 가지는 그림 11과 같은 신호를 생성하고 BEMF 신호는 회전자의 위치와 회전속도

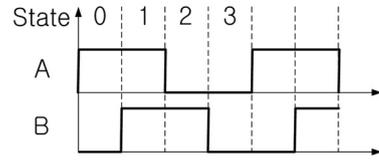


그림 11. 엔코더 신호와 state number.

Fig. 11. Encoder signal and state number.

에 따라 BLDC 모터 권선의 전압을 모사하는 사다리꼴 모양의 파형을 출력한다.

엔코더와 홀 센서의 신호를 출력하는 방법은 다음과 같다. 홀 센서의 출력은 그림 10에서 나타난다. 총 3개의 홀 센서는 6가지의 조합을 출력하고, 엔코더는 그림 11과 같은 출력을 나타내며 총 4가지의 조합을 출력한다. 구형파의 상변화가 일어날 때마다 인터럽트를 발생시켜 출력의 변화를 일으키는 방법으로 펄스를 생성한다.

본 논문에서 구현하는 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터는 250PPR의 해상도를 가지는 엔코더를 모사한다. 엔코더의 신호는 1 회전에 1000번의 상변화를 일으킨다. 시뮬레이션의 대상이 되는 BLDC 모터는 최대 16700RPM을 가진다. 이때 엔코더 신호의 상변화는 약 278KHz로 발생하게 된다. 이를 위해 약 3.6 μ s의 타이머 인터럽트를 발생시켜 엔코더 출력 펄스를 생성한다. 엔코더의 신호는 BLDC 모터의 회전속도에 따라 출력되기 때문에 시스템의 상태변수를 갱신시켜주어야 한다. 하지만 3.6 μ s만에 식 (7) - (10)의 모델방정식을 풀어주기에 STM32F407의 연산능력이 부족하기 때문에 다음과 같은 방법을 이용하여 엔코더 신호를 출력한다[5].

엔코더 신호는 BLDC 모터의 회전속도에 비례하여 출력된다. 제안하는 BLDC 모터의 모델방정식 풀이는 1ms마다 갱신된다. 상태변수가 갱신되는 동안 동일한 속도로 BLDC 모터가 회전한다고 가정하고 엔코더 신호를 출력한다. 엔코더 신호의 상변환이 α 마다 일어난다고 하고 모듈로(modulo) 연산을 통한 정규화를 거친 BLDC 모터의 회전각을 ϕ 라 한다. α 와 ϕ 는 식 (13)과 같은 관계를 가진다.

$$0 \leq \phi < \alpha \quad (13)$$

엔코더 신호를 출력하기 위한 Δ 의 시간(3.6 μ s)이 지나면 각 변위는 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_{n+1} = \phi_n + \Delta \dot{\theta} \quad (14)$$

여기에서 $\dot{\theta}$ 는 BLDC 모터의 회전속도이다. 각 변위 ϕ_{n+1} 이 α 보다 크거나 0보다 작으면 모듈로 연산을 통해 정규화를 하고 엔코더의 출력의 상변화가 이루어진다. 엔코더 신호의 상변화가 이루어지는 상태천이도는 그림 12와 같다.

BLDC 모터의 모델방정식을 갱신하는 동안 BLDC 모터의 회전속도가 일정하다고 가정하고 엔코더 신호를 생성하면 생성된 엔코더의 신호는 $\bar{\theta}$ 만큼의 각 변위를 나타낸다.

$$\bar{\theta} = N\alpha \quad (15)$$

이때 N 은 엔코더 신호 상변화가 일어난 횟수이다. 실제 각

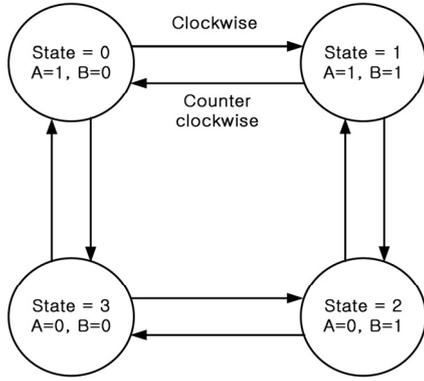


그림 12. 엔코더 신호 생성을 위한 상태천이도.
Fig. 12. State transition diagram for encoder signal generation.

변위 θ 와 엔코더 신호로 측정된 각 변위 $\bar{\theta}$ 는 차이를 보이고 이 둘의 차이를 e 라 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e = \theta - \bar{\theta} \tag{16}$$

각 변위의 차이를 없애기 위하여 비례 보상기를 사용한다. 홀 센서는 BLDC 모터의 전기각으로 1바퀴마다 총 6번의 상변화를 일으킨다. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터에서 사용하는 BLDC 모터는 2개의 자극쌍을 가지고 있어 상변화가 약 0.3ms(3340Hz)마다 일어난다. 홀 센서의 신호는 엔코더 신호를 만들어주는 방법과 동일하게 생성한다. 이때 그림 13의 상태천이도를 이용하여 신호를 만든다.

BEMF는 BLDC 모터를 sensorless 방식으로 구동할 때 필요한 정보이다. 일반적으로 중성점이 외부로 출력되지 않는 BLDC 모터는 상전압을 이용하여 역기전력 신호를 측정한다. BLDC 모터의 상전압은 식 (17)과 같이 나타난다.

$$\begin{cases} (a) : \frac{V_{DC}}{2} + BEMF, & PWM\ ON \\ (b) : BEMF, & PWM\ OFF \end{cases} \tag{17}$$

BEMF: Back Electromotive Force

본 논문에서 구현한 HIL 시뮬레이터는 그림 3과 같은 등가회로를 가지고 100% 듀티비의 PWM신호를 가정하였기

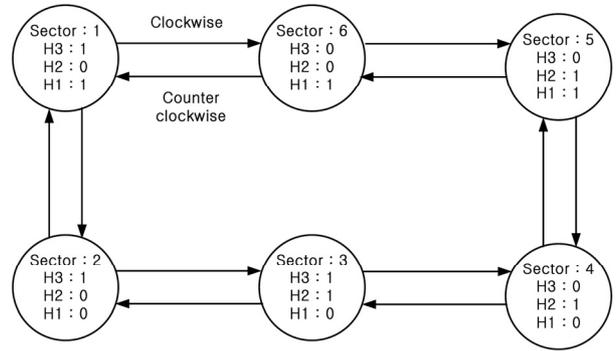


그림 13. 홀 센서 신호 생성을 위한 상태천이도.
Fig. 13. State transition diagram for hall sensor signal generation.

때문에 BLDC 모터의 상전압은 식 (17)의 (a)와 같다. 일반적으로 상전압을 마이크로컨트롤러의 ADC 기능으로 취득하기 위하여 0V ~ 3.3V와 같은 전압으로 낮춰주는 회로를 구성한다. 따라서 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터에서 0V ~ 3.3V의 신호를 출력한다.

BEMF 신호를 구현하기 위하여 STM32F407의 DAC와 PWM을 사용한다. STM32F407에는 총 2개의 DAC가 있어 3개의 상전압을 구현하지 못한다. 따라서 PWM신호와 저항과 커패시터를 이용한 RC필터를 이용해 역기전력 신호를 생성한다.

PWM 신호를 RC필터에 거쳐 역기전력 신호를 생성한다. 1.6MHz의 캐리어 주파수를 가진 PWM 신호를 사용한다. RC필터는 1차 저역통과 필터 역할을 한다. 역기전력 파형을 생성하기 위하여 10KΩ의 저항과 1nF의 커패시터를 이용하여 15.9KHz의 차단 주파수를 가진 저역 통과필터를 사용한다.

그림 14는 DAC와 PWM을 이용하여 생성한 BEMF 신호를 나타낸 그래프이다. 그래프의 x축(시간)의 단위는 500 μs/div이고 y축(전압)의 단위는 1V/div이다. BLDC 모터에 36V를 인가했을 때 나오는 BEMF의 파형을 나타낸다. 그래프에서 파란색은 DAC를 이용한 출력이고 초록색은 PWM 신호와 RC 필터를 이용한 출력이다.

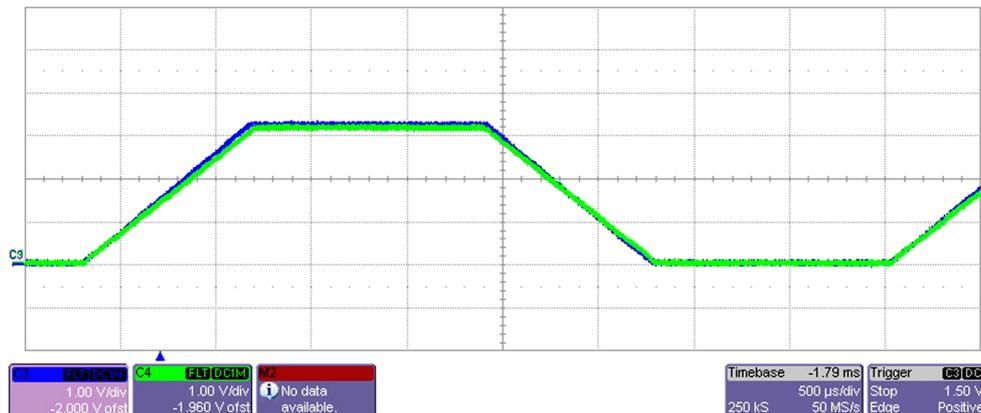


그림 14. 입력이 36V 일 때 생성된 BEMF 파형.
Fig. 14. BEMF wave generated when input is 36V.

4. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터

Core407V 개발보드를 이용하여 그림 15와 같이 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 개발하였다. 인버터에 입력되는 6개의 신호를 입력받고 엔코더, 홀 센서, BEMF 신호를 출력하는 핀이 왼쪽에 위치한다. 마지막 핀은 마이크로컨트롤러와 연결하기 위한 GND핀이다. Core407V와 입출력핀 사이의 점퍼(jumper)는 BEMF 신호를 DAC 방식과 PWM과 RC필터 방식 가운데 하나를 결정하는 부분이다. 위의 4개의 LED는 상태를 표시해준다. LED의 의미는 왼쪽부터 전원, BLDC 모터 정상구동, 잘못된 인버터신호 입력 그리고 쇼트-스투 발생을 표시해준다.

IV. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터 실험

그림 16은 개발한 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터에 36 V를 인가하여 구동한 결과를 나타낸다. 점선은 HIL 시뮬레이터를 이용하여 얻은 결과이고 실선은 Simulink를 이용해 시뮬레이션하여 결과이다. 이 결과를 통해 수정된 BLDC 모터의 모델방정식을 이용하여 개발한 HIL 시뮬레이터가 BLDC 모터의 구현을 정확히 하고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 17은 개발한 HIL 시뮬레이터를 실험하기 위한 구성을 나타낸다. 왼쪽은 Arduino Due의 I/O 핀들을 확장시켜 주는 보드이다. Arduino Due를 이용하여 BLDC 모터를 구동하고 PI제어를 이용한 BLDC 모터의 속도제어를 수행하는 실험을 한다. 이를 위해 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터에 인버터 신호를 입력하고 홀 센서와 엔코더 신호를 받아들이기 위하여 연결한다. Sensored BLDC 모터 제어를 이용하여 실험을 진행하므로 역기전력 신호는 사용하지 않는다.

속도지령으로 500rad/s 의 진폭과 $\frac{3}{\pi}$ 의 주기를 가진 \sin 그래프로 설정하고 이를 추종하는 PI 속도제어기를 구성하고 적용한 실험 결과는 그림 18과 같다. 실선은 HIL 시뮬레이터에서 출력된 엔코더 신호를 이용하여 구한 속도이고 점선은 속도지령을 의미한다. 속도지령을 충실히 추종하는 것을 확인할 수 있다.

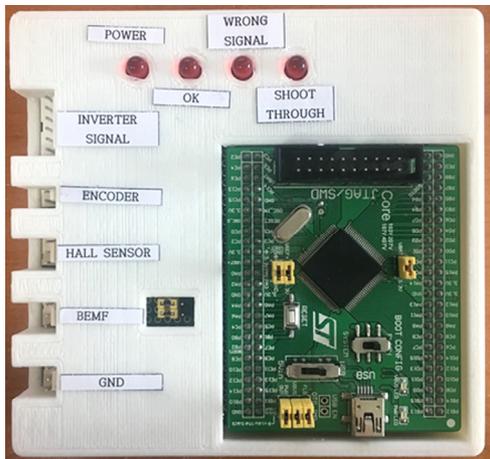


그림 15. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터.
Fig. 15. BLDC motor drive HILS Simulator.

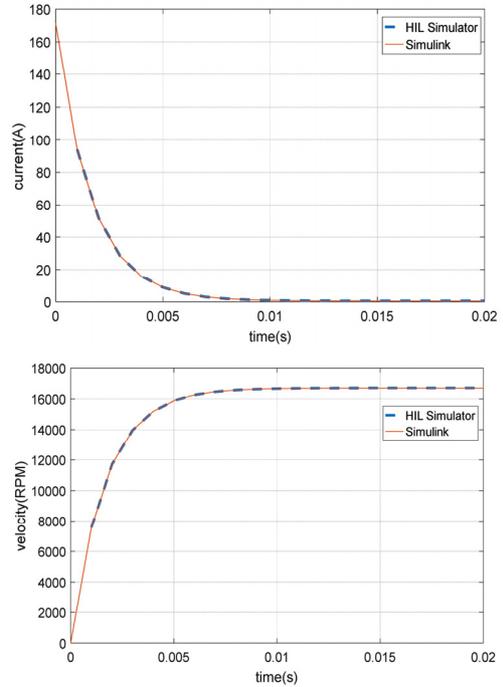


그림 16. HIL 시뮬레이터와 Simulink 시뮬레이션 비교 - (a) 전류, (b) 속도.
Fig. 16. Comparison of HIL Simulator and Simulink simulation - (a) current, (b) velocity.

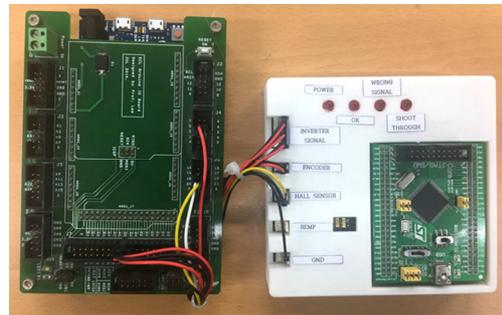


그림 17. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터 실험 구성.
Fig. 17. The experimental configuration for BLDC motor drive HIL Simulator.

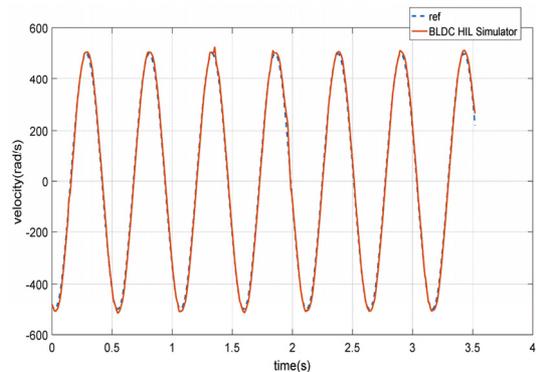


그림 18. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터 실험결과.
Fig. 18. The experimental result of BLDC motor drive HIL Simulator.

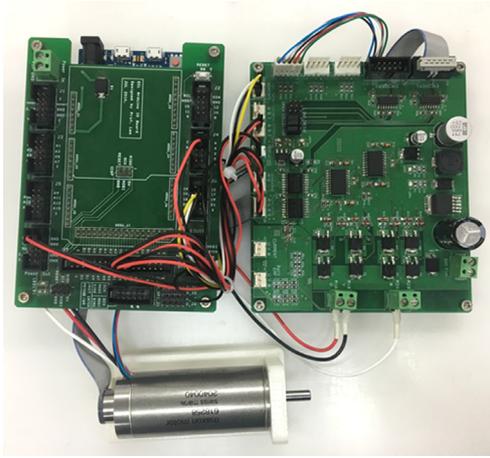


그림 19. 실제 BLDC 모터 구동 시스템.
Fig. 19. Actual BLDC motor drive system.

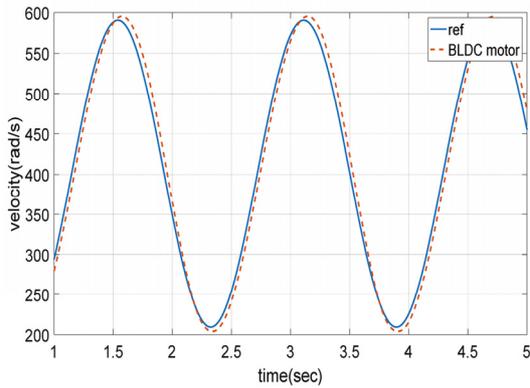


그림 20. BLDC 모터 구동 실험결과.
Fig. 20. The experimental result of BLDC motor drive.

BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 이용하여 생성한 BLDC 모터 구동 알고리즘을 그림 19와 같이 실제 시스템에 적용하는 실험을 진행한다. Arduino Due에는 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 이용해 검증한 임베디드 제어기가 탑재되어 있다. 실험에 사용한 인버터는 연구실에서 자체 제작한 인버터로 총 4개의 하프 브릿지를 가지고 있어 2개의 DC모터를 구동하거나 1개의 BLDC 모터를 구동할 수 있다. BLDC 모터는 시뮬레이션에 사용한 표 1의 데이터를 가진 Maxon 사의 200W, EC-4pole 30으로 부착되어 있는 엔코더는 1024PPR을 가진다. 그림 20은 실제 시스템에 적용하여 속도제어를 수행한 결과이다. BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 통해 구현한 임베디드 제어가 실제 시스템에 적용하는 것을 확인한다.

외부에서 토크를 가했을 때 BLDC 모터의 반응을 확인하기 위해 다음과 같은 실험을 진행한다. 속도제어를 통해 200rad/s의 속도를 추종하고 외부토크를 가하는 실험을 진행한다. HIL 시뮬레이터에서는 속도제어를 시작하고 2초 후에 정격토크의 70%인 63mNm을 주었다. 실제 BLDC모터는 샤프트에 일정한 힘을 가하는 방식으로 외부토크를 인가하였다. 그림 21은 HIL 시뮬레이터를 통해 실험한 결과이다. 파란 점선인 속도지령을 부하토크가 인가된 후에도

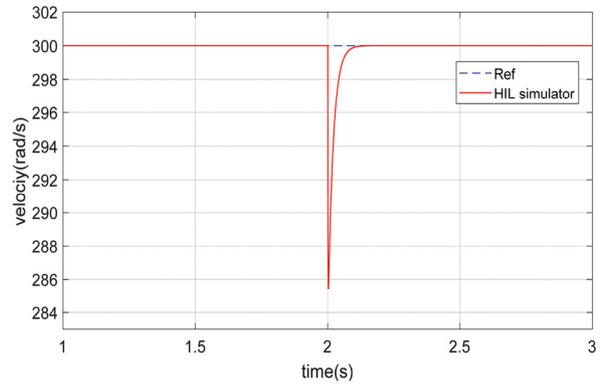


그림 21. HIL 시뮬레이터를 이용한 부하토크를 인가한 BLDC 모터 구동 실험결과 - 속도.
Fig. 21. The experimental result of load torque using HIL simulator - velocity.

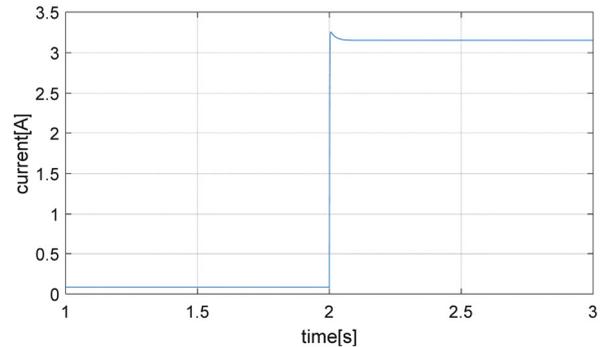
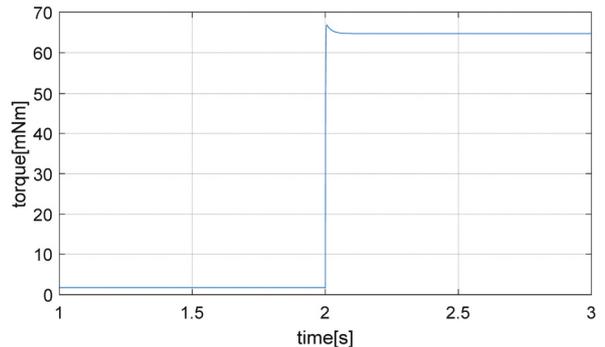


그림 22. HIL 시뮬레이터를 이용한 부하토크를 인가한 BLDC 모터 구동 실험결과 - 토크와 전류.
Fig. 22. The experimental result of load torque using the HIL simulator - torque and current.

잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 이때 BLDC 모터가 발생한 토크와 전류는 그림 22와 같다. 실제 BLDC 모터를 구동한 결과는 그림 23과 같다. 마찬가지로 속도지령을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 시뮬레이터와 달리 지연이 있다. 또한 일정한 토크로 부하토크를 인가하지 못하여 BLDC 모터의 속도가 고르지 못하다.

위의 실험을 통해 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 통해 BLDC 모터의 동작원리, 구동방법에 대한 이해와 임베디드 제어기 구현을 적은 비용과 시스템 파손에 대한 걱정 없이 손쉽게 수행할 수 있음을 알 수 있다.

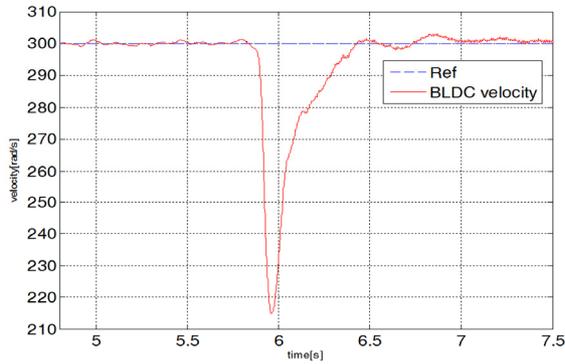


그림 23. 부하토크를 인가한 BLDC모터 구동 실험결과 - 속도.

Fig. 23. The experimental result of load torque drive - velocity.

V. 결론

본 논문에서는 마이크로컨트롤러를 이용한 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터의 개발에 대하여 다루었고 개발된 HIL 시뮬레이터의 성능검증을 위한 실험과 실제 시스템을 대체가능성에 대한 실험을 진행하였다. HIL 시뮬레이터에서 실시간으로 풀이될 수 있도록 수정된 BLDC 모터의 모델방정식을 제안하였다. 수정된 BLDC 모터의 모델방정식과 마이크로컨트롤러를 이용하여 BLDC 모터 구동 HIL 시뮬레이터를 구현하는 방법을 제안하였다. Corex M4기반의 마이크로컨트롤러를 이용하여 인버터를 모사하는 부분, BLDC 모터를 모사하는 부분, BLDC 모터의 출력을 모사하는 부분으로 나누어 HIL 시뮬레이터를 구현하였다. 본 논문에는 약 3만원으로 BLDC 모터의 HIL 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 HIL 시뮬레이터의 검증과 HIL 시뮬레이터를 이용한 임베디드 제어기 설계를 진행하여 성공적인 결과를 얻었다. 저렴한 가격으로 시스템에 파손에 대한 걱정 없이 BLDC 모터의 동작원리와 구동방법에 대한 이해를 높이고 임베디드 제어기의 구현에 도움을 줄 수 있는 시스템의 제안이 본 논문의 의의라 할 수 있다.

REFERENCES

- [1] M. Bacic, "On hardware-in-the-loop simulation," *Proc. of the 44th IEEE conference on decision and control, and the european control conference 2005*, Seville, Spain, pp. 3194-3198, Dec. 2005.
- [2] H. Y. Kim, D. C. Lee, E. J. Rhee, and K. Y. Koak, "A study on an MR damper HILS system for a bus," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 23, no. 2, pp. 109-116, 2017.
- [3] A. Soltani and F. Assadian, "A hardware-in-the-loop facility for integrated vehicle dynamics control system design and validation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 21, pp. 32-38, 2016.
- [4] H. Wenbo and Z. Qiang, "The hardware-in-the-loop simulation on the control system of a small launch vehicle," *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 1867-1871, 2012.
- [5] J. S. Choi and Y. S. LEE, "The implementation of a hard-

ware-in-the-loop simulator for an inverted pendulum system using open-source hardware," *Journal of Institute of Control Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 23, no. 2, pp. 117-125, 2017.

- [6] B. K. KUK and M. Ehsani, "Advanced simulation model for brushless DC Motor drives," *Electric Power Components and Systems*, vol. 31, no. 9, pp. 841-868, 2003.
- [7] S. Baldursson, "BLDC motor modelling and control MATLAB/SIMULINK implementation," Master Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2005.
- [8] M. Baszynski, "Low cost, high accuracy real-time simulation used for rapid prototyping and testing control algorithms on example of BLDC motor," *ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING*, vol. 65, no. 3, pp. 463-479, 2016.
- [9] C. Dufour, J. Belanger, S. Abourida, and V. Lapointe, "FPGA-based real-time simulation of finite-element analysis permanent magnet synchronous machine drives," *Proc. IEEE Power Electronics Specialists conference 2007*, Orlando, USA, pp. 909-915, Jun. 2007.
- [10] T. Schulte and J. Bracker, "Real-Time simulation of BLDC motors for hardware-in-the-loop applications incorporating sensorless control," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, UK, pp. 2195-2200, Jun. 2008.
- [11] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part 11: The Brushless DC Motor Drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, Apr. 1989.
- [12] K. Krykowski and J. Hetmanczyk, "Constant current models of brushless DC motor," *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 19-24, 2013.



조 봉 언

2015년 인하대 전기공학과 졸업. 2017년 동 대학원 석사. 2017년~현재 동 대학 박사과정 재학 중. 관심분야는 임베디드 시스템, RCP.

이 영 삼

제어·로봇·시스템학회 논문지, 제15권 제4호 참조.