반도체디스플레이기술학회지 제13권 제4호(2014년 12월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 4. December 2014.

VHDL과 FPGA를 이용한 BLDC Motor의 속도 제어 시스템 구현

박운호* · 양 오†
†*청주대학교 반도체공학과

Implementation of the BLDC Motor Speed Control System using VHDL and FPGA

Woon Ho Park* and Oh Yang†
†*Semiconductor Engineering of CheongJu University

Abstract

This paper presents the implementation for the BLDC motor speed control system using VHDL and FPGA. The BLDC motor is widely used in automation for its good robustness and easy controllability. In order to control the speed of the BLDC motor, the PI controller used for static RPM output of the BLDC motor to variations in load. In addition, by using the DA converter, we were able to monitor the BLDC motor reference speed and the current speed through real time. The motor speed command and the parameters of the PI speed controller were modified easily by the FPGA and the AD converter. Finally, in order to show the feasibility of the control algorithm the speed control characteristics of the motor was monitored using an oscilloscope and the DA converter. Further, the speed control system was designed in this paper has shown the applicability of the drive system of the factory automation.

Key Words : VHDL, FPGA, BLDC Motor, PI controller, Speed control

1. 서 론

최근 산업용 시스템, 로보틱스, 항법유도, 통신, MVI (Multimeadia Video and Imaging), 방위 산업 등과 같이 고성능 DSP (Digital Signal Processing)기술에 대한 의존도가 높고 빠르게 성장하고 있는 시장은 계속해서 유동적으로 변화하고 있다. 표준 변경은 물론, 시장 수용의 변화, 고객 요구의 변화, 경제적 변화, 경쟁 구도의 변화 등이 지속적으로 이뤄지고 있으며, 기업은 잠재적 비즈니스 기회를 창출하기 위해서 혁신과 유연성을 통해 이에 대응해 나가고 있다.

고성능 DPS 솔루션이 요구되는 시장에서 FPGA (Field Programmable Gate Array) 플랫폼 기술의 적용은 점점 확대되고 있다. FPGA 는 고도의 연산 작업을 병렬 아키텍처로 구현할 수 있어 연산 중 발생하는 부하를 최소화할 수 있다. 또한 재구성 가능한 FPGA의 특성은 예측하지 않은 환경 및 기능 변화에 신속하게 대응할 수 있으며, 보다 높은 수준의 집적도를 제공함으로써 더욱 적절한 비용으로 시스템 개발이 가능하다[1].

그리고 최근에 BLDC 모터가 여러 산업 응용 분야에서 DC모터를 급속히 대체하고 있다. 그 이유 중에 하나는 DC모터는 브러시와 정류자에 의해서 기계적으로 전류 방향을 바꿔 연속적인 토크를 발생시키고 수명, 소음, 노이즈(Noise), 속도 변화 등의 한계가 있다. 그러나 BLDC모터는 위의 특성 때문에 DC모터보다 가격이 비싸며, 구동이 어려워서 범용으로 사용되는 것은 제한되고 있다. 하지만 자동차 산업, 우주산업, 의료기기, 공장 자동화뿐만 아니라 일반 사무용품 등 가전기기의 제어용으로 확고히 자리 잡고 있다[2-4].

본 논문에서는 VHDL과 FPGA를 이용하여 BLDC Motor Controller IC를 설계하고자 한다. BLDC 모터 제어 시스템을 만드는데 있어 AD 변환기를 이용하여 지정속도를 입력 해주고, DA 변환기를 이용하여 지정

†E-mail : ohyang@cju.ac.kr

속도와 현재속도를 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템과 BLDC모터를 제어하는데 있어 효율과 신뢰성을 높이기 위하여 PI제어기를 사용하고자 한다. 이러한 시스템을 설계하여 상용화의 가능성을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1. BLDC모터의 특성 및 구동 원리

BLDC 모터는 전류를 위해 브러시를 사용하지 않고 제어회로에 의해 전자적으로 정류된다[5].

BLDC모터는 높은 속도대 토오크 특성을 가지고 높은 동적 응답, 고효율, 긴 수명, 저소음, 높은 속도 영역의 많은 장점들이 있다. 하지만 다른 모터에 비해 가격이 비싸고, 대형의 모터가 개발되어 있지 않으며, 고장시 수리에 어려움이 많은 것이 단점으로 지적되고 있다. BLDC모터는 브러시나 슬립 링과 같은 기계적 접촉부를 갖지 않은 구조를 하고 있다. 이는 유지에서도 직류모터와 같은 고속응답성, 제어성, 효율성을 기대할 수 있는 모터이다[6].

BLDC모터의 상변수를 사용한 3상 고정자 권선의 전압 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다[7].

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} la \\ lb \\ lc \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ls & M & M \\ M & Ls & M \\ M & M & Ls \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} la \\ lb \\ lc \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 Va, Vb, Vc는 전동기의 상전압을 나타내고 Rs는 각상의 고정자 군선의 값을 나타내며, Ls 및 M은 각각 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스를 나타낸다. 역기전력 ea, eb, ec는 회전자의 위치에 대해 사다리꼴(Trapezoidal)형태의 파형을 가진다. 3상 Y-결선 모터의 전류평형의 관계를 이용하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현된다[7].

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} la \\ lb \\ lc \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} la \\ lb \\ lc \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, L = Ls – M을 나타낸다. 또한 BLDC모터에서 발생하는 토오크는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Te = \frac{(ea\,la + eb\,lb + ec\,lc)}{Wr} \quad (3)$$

여기서, Wr은 모터 회전자의 속도를 나타낸다[7].

Table 1에서는 BLDC모터를 시계방향(CW : Clock Wise) 운전시 홀센서에 따른 3상 BLDC모터의 구동 상태표를 나타내었다.

Table 1. BLDC Motor driving state table (CW)

Input			PWM_A		PWM_B		PWM_C	
HA	HB	HC	H	L	H	L	H	L
1	0	1	0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

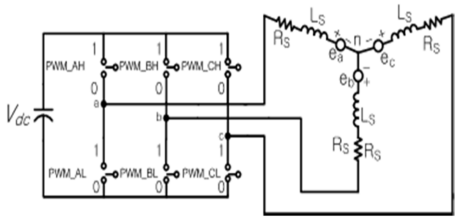

Fig. 1. The driving system of three phase BLDC motor.

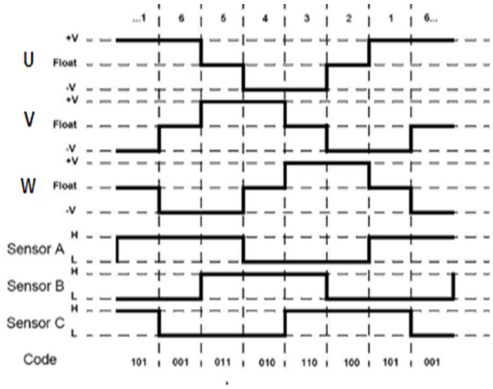

Fig. 2. Hall and voltage waveforms for BLDC motor speed control.

Fig. 1은 3상 BLDC모터의 구동 시스템을 나타내었고, Fig. 2는 BLDC모터의 구동을 위한 U, V, W상에 입력하는 전압파형과 BLDC모터의 홀센서에서 출력되는 파형을 나타내었다.

2.2. PI제어

PI제어기는 비례적분 제어기로 지정속도와 현재속도

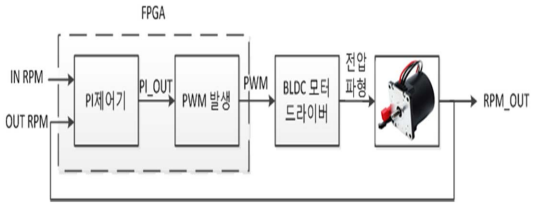

Fig. 3. PI Controller Algorithm.

사이의 오차의 비례상수 이득을 곱해서 제어하는 비례 제어기(Proportional Controller)와 오차 신호를 적분하여 제어 신호를 만들어내는 적분 제어기(Integral Controller)를 병렬로 연결하여 사용하는 제어 기법을 말한다[8]. Fig. 3은 PI제어기의 알고리즘을 나타내었다.

여기서 IN RPM은 기준이 되는 출력 속도, RPM_OUT은 현재 출력속도, OUT PRM은 BLDC모터에서 Feedback받는 BLDC모터 속도, PI_OUT은 PI제어기에서 계산된 결과, PWM은 PI제어기의 결과 값에 따라 정해준 Pulse파형, 전압파형은 Fig. 2의 U, V, W의 파형을 의미한다. 그림의 PI제어기를 수식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$PWM = Err \cdot Kp + Ki\int_0^{\tau}(Err - Ka)dt \qquad (4)$$

2.3. BLDC 모터 제어 시스템

VHDL 과 FPGA를 이용하여 설계한 BLDC모터 제어 시스템의 전체적인 Block diagram은 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 FPGA에서 3상의 PWM을 발생하여 BLDC모터의 드라이버에 공급되고, 이때 3상의 홀 센서의 위치정보가 FPGA에 입력된다. 또한, 디버깅을 위해 DA, AD 변환기를 사용하며 속도지령으로는 가변

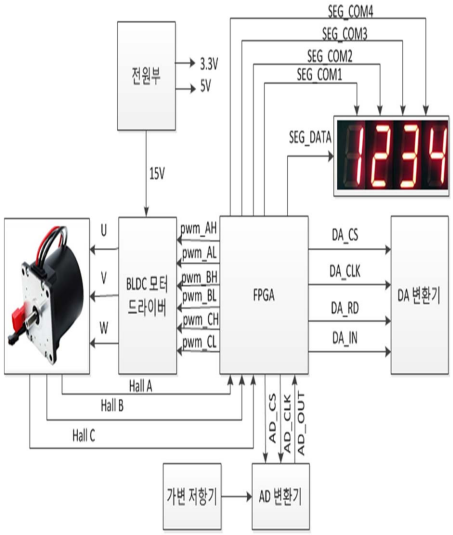

Fig. 4. Block diagram for BLDC motor controller.

저항을 사용하였다. 아울러 속도의 정보는 7-세그먼트에 표시하여 현재의 속도를 표시하였다.

전체적인 회로는 전원부, FPGA, BLDC모터 드라이버, AD 변환기, DA 변환기, 가변 저항기, BLDC 모터, 7-Segment로 구성되어 있다.

본 논문에서는 AD 변환기와 가변 저항기를 사용하여 BLDC모터의 속도를 결정해주었다. 가변 저항기를 통해 나오는 전압(0 ~ 5 V)를 AD 변환기로 변환할 값을 입력해주고 FPGA를 통해서 Fig. 5와 같이 AD 변환기에 필요한 AD_CS, AD_CLK 파형을 만들었다.

Fig. 6의 DA_out(Digital 출력)은 임의로 입력해준 데이터이다. 위의 시뮬레이션 결과 파형을 보면 알 수 있듯이 AD_CS가 상승 할 때 마다 AD 변환기에서 출

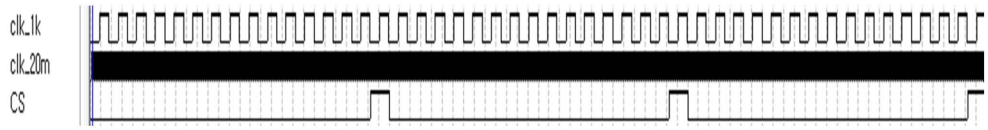

Fig. 5. Simulation result of the AD_clk(clk_1k), AD_CS(CS) for FPGA and AD converter.

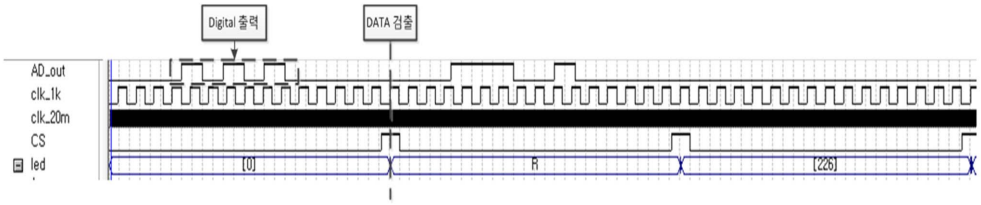

Fig. 6. Simulation result of the Digital output for the AD converter.

력되는 Digital신호를 LED에 출력되게 설계했다. AD 변환기는 12bit이고 LED는 8개이기 때문에 본 논문에서는 AD 변환기에서 출력되는 값의 최하위 4bit를 버려 8bit를 만들어BLDC모터의 속도를 결정해 주게 설계 하였다.

AD 변환기를 이용해 결정된 속도는 7-세그먼트를 통해서 확인 할 수 있게 표시해 실시간으로 지정된 속도를 확인할 수 있다.

Fig. 7은 FPGA에서 DA 변환기를 구동하기 위한 CLK과 CS, LOAD, SDI, RESET의 파형을 나타낸 시뮬레이션 결과이다. DA_SDI는 FPGA내에서 측정된 현재속도와 지정속도의 Digital값이다. 그 Digital값을 DA 변환기를 이용해 전압으로 변환시키게 설계하였다. DA 변환기에서 출력되는 전압을 측정하면 현재속도와 지정속도를 실시간으로 모니터링 할 수 있다. DA 변환기의 정확도를 올리기 위해서 12bit DA 변환기를 사용하였다.

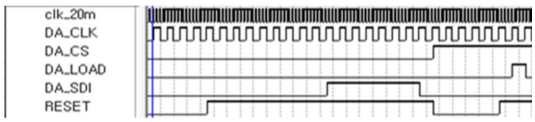

Fig. 7. Simulation result for FPGA and DA converter.

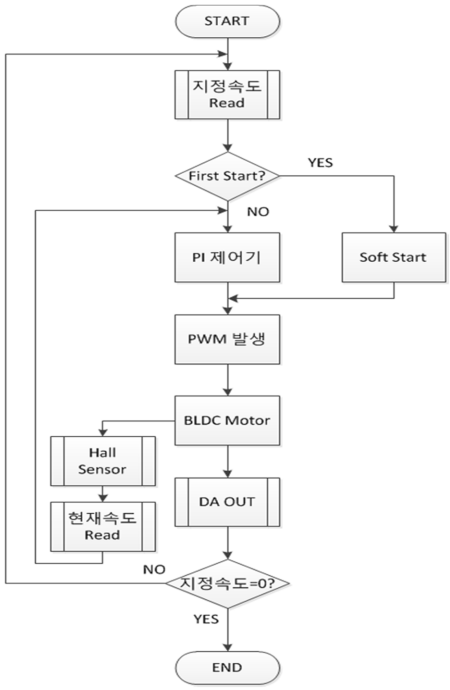

Fig. 8. Flow chart for soft start and PI controller.

제안한 BLDC Motor Controller IC에서는 갑자기 빠른 속도로 BLDC모터가 동작하게 되면 오작동을 일으키거나 파손되는 것을 방지하기 위해, 낮은 속도부터 원하는 출력 속도까지 서서히 증가 시키는 Soft Start를 사용하였다. Fig. 8에서는 Soft Start와 PI제어기에 대한 흐름도를 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1. BLDC모터 구동

FPGA에서 PWM_AH, PWM_AL, PWM_BH, PWM_BL, PWM_CH, PWM_CL의 Pulse 파형을 만들어서 BLDC 모터 드라이버로 파형을 넣어주었다. Fig. 9는 BLDC모터 드라이버에서 출력되는 U, V, W의 파형을 BLDC모터의 U, V, W로 넣어준 전압 파형을 측정한 결과이다.

Fig. 10은 BLDC모터에 내장되어있는 홀센서에서 나

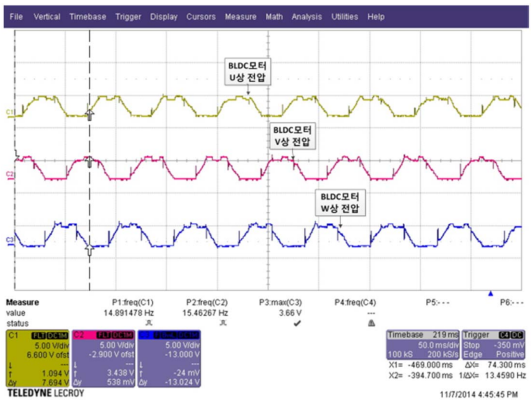

Fig. 9. U, V, W phase voltage waveform of the BLDC motor.

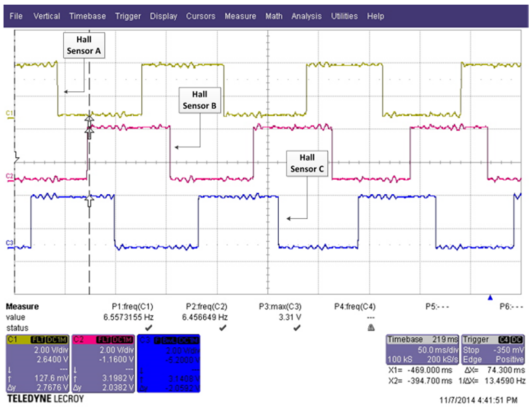

Fig. 10. Hall sensor voltage waveform of the BLDC motor.

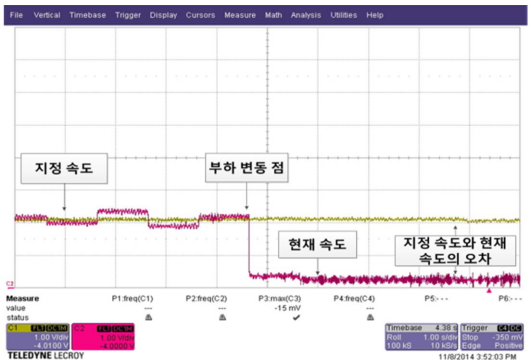

Fig. 11. In the absence of PI controller.

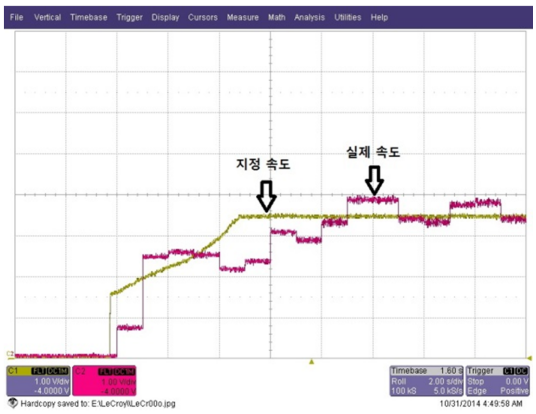

Fig. 12. DA converter with PI controller monitoring.

오는 전압 파형을 측정한 결과이다. 모터가 동작하기 시작하면 Fig. 10의 파형과 같이 출력되게 된다. 홀센서에서 출력되는 파형이 상승에지 일 때 마다 1씩 카운터를 하여서 모터의 속도를 측정할 수 있었다.

3.2. PI제어기 실험

Fig. 11과 Fig. 12를 보면 PI제어기가 있을 때와 없을 때의 차이를 확실히 구분할 수 있다. Fig. 11은 PI제어기가 없을 경우 외부에 부하가 걸렸을 때의 파형을 DA 변환기로 나오는 전압 파형을 측정한 결과를 나타내었다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 외부에 부하가 걸리게 되면 BLDC모터는 멈출 위험이 있다. 그렇게 된다면 BLDC모터의 신뢰성과 안전성을 보장할 수 없다.

Fig. 12는 PI제어기를 사용하였을 때 DA 변환기로 나오는 전압 파형을 측정한 결과를 나타내었다. Fig. 12를 보면 알 수 있듯이 지정속도를 결정해주면 현재속도가 지정속도와의 오차를 줄여가면서 따라가는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Results of the speed error

지정속도	속도오차	백분율오차
500(RPM)	-30 ~ +30 (RPM)	±6%
1000(RPM)	-70 ~ +10 (RPM)	±7%
1500(RPM)	-70 ~ +30 (RPM)	±4.7%
2000(RPM)	-40 ~ +90 (RPM)	±4.5%
2300(RPM)	-10 ~ +10 (RPM)	±0.4%

Table 2는 BLDC모터의 지정속도를 분당 500, 1000, 1500, 2000, 2300으로 넣어 주었을 때 RPM측정기를 사용하여 측정한 현재속도와 지정속도의 오차범위를 나타낸 표이다. 측정결과 오차범위의 백분율은 각각 ±6%, ±7%, ±4.7%, ±4.5%, ±0.4%로 측정되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 VHDL과 FPGA를 이용하여BLDC모터의 속도 제어 시스템을 구현해 보았다. 가변 저항기와 AD 변환기를 사용하여 지정속도를 입력 받게 구현하였고 LED로 AD 변환기에서 디지털 신호가 잘나오는지 확인할 수 있다. 그리고 7-Segment에 지정속도를 표시할 수 있게 구현하였다.

또한 PI제어기를 사용하여 BLDC모터를 구동 하는데 있어 신뢰성과 안정성을 높이게 되었고 DA 변환기를 통해 실시간으로 지정속도와 현재속도를 모니터링 할 수 있어 BLDC모터의 속도를 제어하는데 있어 이상이 생겼을 때 문제점 찾기에 편리함을 보였으며 특히 속도오차가 적고 안정적인 동작특성을 보임으로써 상용화의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

1. Gyeong-Seok Kim, Hyeon-Gu Kim, Hui-Yeong Park, Jun-Dae Kim, Yeong Kwon, “A Development of BLDC Motor Control IP based on FPGA”, Institute of Control, Robotics and Systems, ICROS Conference materials, pp.176-181, 2011.5.
2. Seung-Ryeol Ham, “The speed Control of BLDC Motor Using Wireless Communication”, Graduate school, Cheongju Univ.(Master)2010.
3. Y Dote and S Kinoshita, Brushless Servomotors-Fundamentals and Applications Clarendon Press, 1990
4. T. J. E. Miller, Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives Clarendon Press, 1989
5. Sang-Hun Kim, DC, “AC and BLDC Motor Control

Bokdu publisher", 2010.
6. Myeong-Kyun Kim, Jin-Soo Kim and Oh Yang, "Design of the Position Control System for Parabolic Antenna using Gyro Sensor", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 12, No. 2, June 2013.
7. Gyeong-Hwa Kim, Mun-Jong Jeong, Tae-Deok Kim, Yeong-Man Kim, "High Speed Sensorless Control of Brushless DC Motor Using DSP", Institute of Power Electronics Conference materials, pp.37-40, 1999.
8. In-Hyeok Kim, Gu-Jong Jeomg, Yeong-Ui Son, "Design of controller for DC/DC boost converter using PI observer", Institute of Electrical Engineers Conference materials, pp.1650-1651, 2009.

접수일: 2014년 12월 2일, 심사일: 2014년 12월 12일,
게재확정일: 2014년 12월 22일