



휠인 모터 구동을 위한 제어 및 계측 시스템 설계

The Design of a Control & Measurement System for the Driving of Wheel-in Motor

최중경[†]
Jung-Keyng Choi[†]

•창원대학교 전자공학과

[†]Department of Electronic Engineering, Changwon National University

요 약

본 논문은 회전 동력을 직접 바퀴에 전달하는 휠인 직구동 모터를 제어 대상으로 하여 속도 계측 및 제어시스템을 설계하는 방법에 대한 논문이다. 지능 제어기로서 16비트급 모션제어 전용의 dsPIC30F2010 마이크로프로세서를 사용한다. 프로세서의 여러 기능 중 내부의 최소 기능인 시스템 클럭, PWM, I/O, Timer 및 통신만을 사용하였고, 홀 신호 계측 및 제어 소프트웨어 기능에 대한 동작 특성을 시험하였다. 또한 이러한 기능을 이용하여 PDFF 속도제어 프로그램을 구현하고, 그 실험 결과를 보인다.

키워드 : 휠인, 계측 및 제어시스템, 모션제어

Abstract

This paper suggests speed measurement and control system design methods to drive the Wheel-in Motor that is transfer rotational force to the hub of the wheel and drives it directly. The dsPIC30F2010 16 bit micro-processor specified to motion controller is used as a intelligent controller. The minimum functions of dsPIC30F2010, system clock, PWM output, I/O, timer, communication, applicable to motor control are used and operating characteristics of hall signal measurement and control software functions are tested. Also the algorithm including PDFF speed control program was implemented using this software functions and show the experimental results.

Key Words : Wheel-in, Measurement and Control System, Motion Control

Received: Jul. 17 2015

Revised : Jul. 29, 2015

Accepted: Jul. 30, 2015

[†] Corresponding author
cj@changwon.ac.kr

이 논문은 2013–2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

현대의 마이크로 모션제어기는 새로운 집적 기술 및 다양한 기능들로 인하여 하나의 칩에 많은 모듈들을 내장하도록 설계되고 있으며, 그 부피 및 가격이 최적화 되어 개발되고 있다. 최근에는 DSP(Digital Signal Processor)라는 32비트 이상급의 고성능 부동소수점 연산전용의 모션제어기가 각광을 받고 있고, 서보 모터 구동제어에 많이 사용되고 있다[1]. 본 연구에서는 이러한 다양한 마이크로프로세서 칩 중에서 휠인(wheel-in) 직구동 모터를 제어하기 위해 가격 및 부피, 기능 면에서 최적화된 지능 제어기인 dsPIC30F2010을 선택하였다. 이 지능 프로세서는 마이크로칩(MICROCHIP)사의 제품으로 DSP(Digital Signal Processor)와 16비트급 마이크로컨트롤러의 강점을 단일 코어로 통합한 디바이스이다. 최대 30MIPS의 연산 속도를 제공하는 이 제품은 프로그래밍 작업의 효율성을 높이도록 설계되었으며 플래쉬 프로그램 메모리, 데이터 EEPROM 메모리, 강력한 주변 장치 및 다양한 소프트웨어 라이브러리를 갖추고 있다. 툴 및 디자인 환경 또한 기존의 MPLAB IDE로 사용이 가능하여 기존 사용자에게 친숙하며 DSP의 기능으로 고속의 제어가 필요한 모터, 전력 변환, 음성/오디오 등을 위해 개발된 제품이다. 그리고 기본적으로 PWM, A/D 변환기 및 기타 입출력 및 시리얼 통신을 갖추면서 낮은 가격에 높은 신뢰성을 가지고 있다. 그리고 모터 구동에 있어 게이트 구동간의 Dead Time 구간을 dsPIC30F2010 내부에서 하드웨어적으로 구현하고 있어 모터 제어에 적합한 개발 칩으로 많은 분야에서 적용되고 있다[2].

본 연구는 이러한 마이크로칩을 이용하여 휠인 모터를 구동하기 위한 속도제어 및 홀 신호 계측 알고리즘을 소프트웨어로 구현하였다. 속도제어루틴 안에서 모터를 바로 구동하기 위한 PWM 계산이 이루어지며, 속도데이터와 회전자 절대위치데이터를 속도제어 주기와 다른 가변 주기로 검출하여 계측의 효율성을 높였다. 특히 홀센서를 이용하는 절대위치 계측 및 속도 검출법은 기존의 방법[3]과 차별화되는 것으로 속도제어 주기와 비동기로 발생하는 홀 신호의 특성을 잘 활용하는 방법이라 하겠다. 그리고 전류제어 루틴의 수행 없이 속도 오차에 근거한 PWM 듀티 조절(일종의 전압지령) 방법을 사용하여 제어 알고리즘의 간결성을 얻었다.

2. dsPIC30F2010 모션제어기 구조

dsPIC30F2010을 이용하는 제어시스템 설계를 위해 사용되는 기능을 정리하면 아래 그림1과 같다. 모션 제어기의 구성은 내부 PLL을 이용하는 20MHz의 클럭과 직구동 모터를 구동하기 위한 PWM, 외부에서 입력되는 아날로그 신호(모터의 전류, 속도지령)를 읽기 위해 A/D를 설정하였으며, 회전자 절대위치 신호인 Hall 신호 3개, 모터 정지를 위한 brake 신호, 모터 구동을 위한 Throttle 신호 및 외부 신호를 인식하기 위해 I/O를 설정하였다. 프로그램 개발의 편리성을 위해 프로그램 다운로드 및 오류 검출을 위해 ICD(In-circuit Debugger)기능을 설정하였으며 외부와 통신을 통해 실시간 데이터 모니터링 및 제어 파라미터 보정을 위해 SCI 기능을 설정하여 외부와 시리얼로 통신이 가능하도록 설정하였다[4].

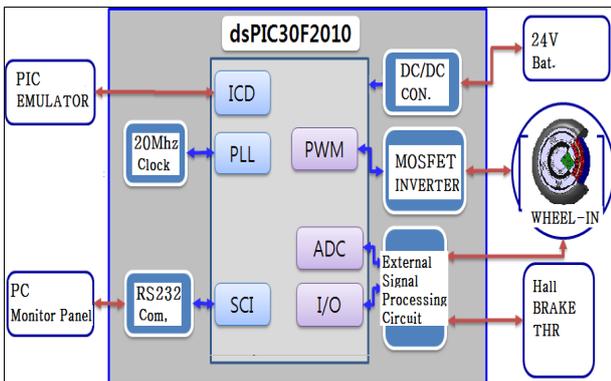


그림 1. dsPIC30F2010를 이용하는 모션제어시스템을 위한 내부 기능

Fig. 1. The internal function for motion control system using dsPIC30F2010

그림2는 PIC제어기와 MOSFET 인버터, 그리고 휠인 모터와의 신호 연결 모양을 보여 주고 있다.

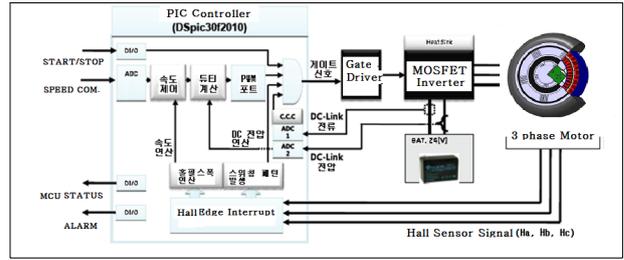


그림 2. dsPIC30F2010 마이크로제어기와 MOSFET 인버터를 이용하는 휠인 전동기 제어 시스템
Fig. 2. The wheel-in motor control system using dsPIC30F2010 micro controller and MOSFET inverter

그림3과 4는 실제 구현된 PIC 제어기와 MOSFET 인버터 구동부가 하나의 보드로 구성된 모양과 모터 내부에 내장된 모습을 보여주고 있다.

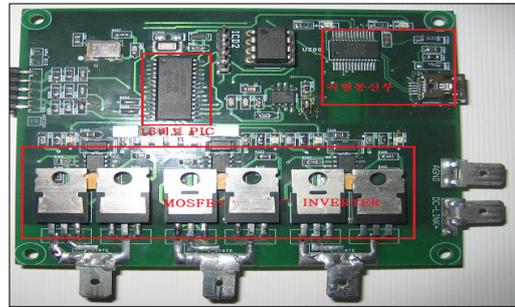


그림 3. PIC 제어기 및 MOSFET 구동부가 일체화된 시험 제작 보드

Fig. 3. The unified test board composed with PIC controller and MOSFET driver

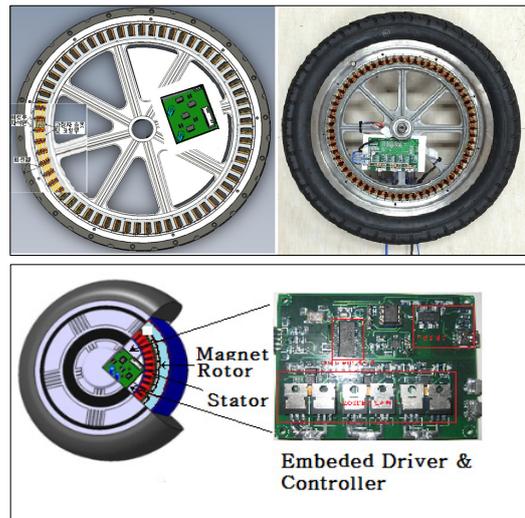


그림 4. 허브 BLDC 모터 내장 구동제어기의 모습
Fig. 4. The Shape of a Hub BLDC Motor Embedded Driver & Controller

설계된 구동제어기는 dsPIC30F2010 16비트급 마이크로 제어기와 24V 배터리 입력을 12V/5V로 출력하는 컨버터 전원부, 6개의 독립된 MOSFET 인버터와 개별 게이트 구동회로, 외부 제어 신호(속도지령, 브레이크신호 등), 홀 신호 인터페이스 회로부 등을 갖추고 있다.

3. 제어소프트웨어 체계

소프트웨어 프로그램 작성은 먼저 모니터링 및 제어를 위한 판넬 프로그램으로부터 시작된다.

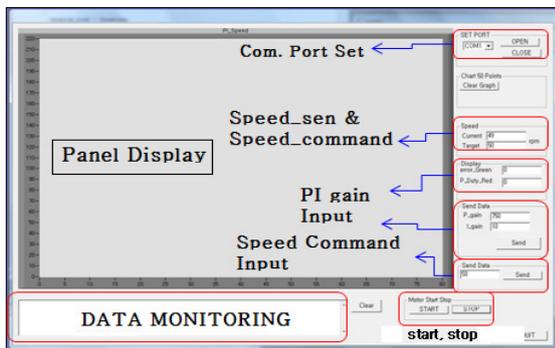


그림 5. 데이터 모니터링 및 제어관리 판넬

Fig. 5. The operation panel for data monitoring and control

비주얼 C 프로그래밍을 이용하여 판넬 프로그램이 작성되었다. 그림5, 6을 통해서 보면, RS232 통신포트 설정 및 통신데이터 모니터링 창을 통해 PC와 통신 포트 간의 대화 및 설정이 가능하도록 되어있으며, 각종 제어 변수(모터속도, PI 게인 등)를 실시간으로 세팅 할 수 있도록 프로그램이 작성되었다. 그 밖에 에뮬레이터의 기능을 이용하여 변수 모니터링 및 프로그램 디버깅 기능을 수행할 수 있도록 판넬 프로그램이 되었다[5].

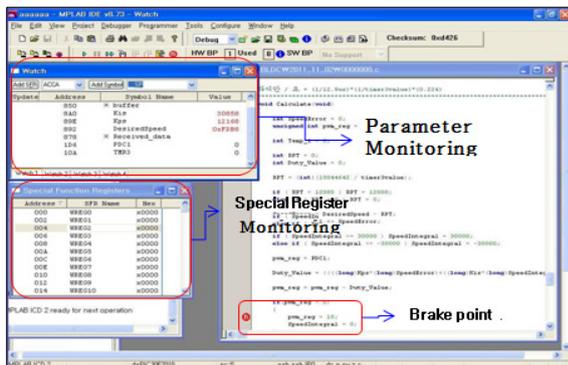


그림 6. 디버거 판넬

Fig. 6. The debugger panel

전체 제어프로그램 구성을 소개 한다. 프로그램 시작에서 변수 및 함수를 초기화하고, I/O 및 인터럽트, PWM 및

타이머, 통신관련 레지스터를 세팅하며, 마지막에 모터의 초기 상태인 홀 신호 값을 확인한다. 다음에는 MAIN 프로그램 수행으로 0.6(600ms)초 마다 232 통신 데이터를 송수신하며, 제어 변수인 구동정지명령, PI 게인 및 속도지령의 업데이트를 확인한다. 다시 0.06(60ms)초 마다 속도 데이터를 송신하고, 목표 속도를 업데이트 한다. 그리고 약 0.2ms(217.6us) 마다 타이머 인터럽트를 가동하여 상위 시간(60, 600ms)들을 만들기 위한 기본 시간 타이밍을 만들고, 모터의 절대위치에 따른 최적 여자시퀀스 및 속도제어 PWM 듀티를 계산하여, 최적 여자 신호를 내보낸다. 결국 속도제어 주기는 217.6us 로 매 홀 신호 엿지 마다 인터럽트 루틴에서 기준 클럭을 카운팅하여 계산되어진 속도 검출 신호를 토대로 제어를 수행하게 된다. 참고로 3상의 홀 신호는 모터의 자극에 반응하는 3개의 120도 간격 배치 센서로 N극에 하이 S극에 로우를 출력하므로 3개의 센서를 조합하면 전기각 60도 간격으로 절대 위치가 검출된다. 직구동 모터인 경우 다극 모터이고, 본 연구에서는 56극, 28극 쌍수 회전자를 사용하므로 전기각 60도는 기계각으로 $(\frac{1}{28} \cdot 60^\circ) = \frac{60^\circ}{28} = 2.14^\circ$ 가 된다. 즉 2.14도 회전마다 홀 신호 엿지에 의한 인터럽트 발생으로 속도가 미리 계산되어질 수 있다. 본 연구에서는 신호의 안정성을 위해 홀 신호 한 상만을 이용하여 속도를 계측 한다. 즉 전기각 360도 주기마다 속도가 계산되는 셈이다. 그림7, 8에서 홀 신호 인터럽트를 이용하는 가변주기 속도 계측 알고리즘을 설명한다.

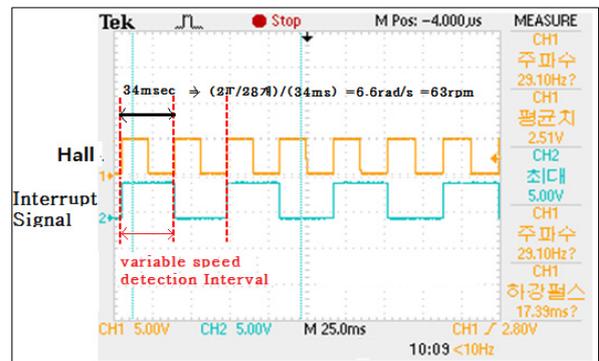


그림 7. 홀 신호와 속도 계산 인터럽트 발생 주기 계측

Fig. 7. The measurement of hall signal and interrupt interval for speed calculation

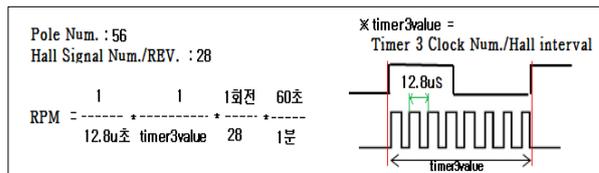


그림 8. 홀 신호와 일정주기 카운터 펄스와의 관계

Fig. 8. The relationship of hall signal and constant interval counter pulse

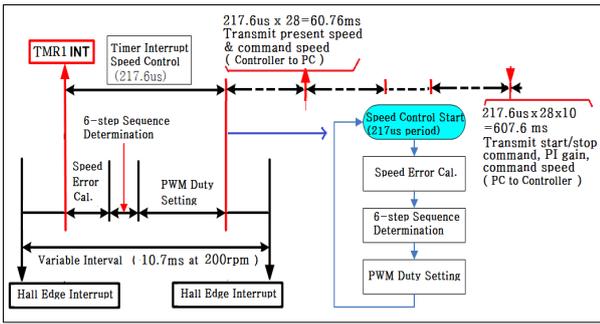


그림 9. 속도제어 인터럽트 처리루틴
Fig. 9. Interrupt service routine for speed control

그림 9에서는 PIC 내부 클럭 및 타이머, 홀 신호를 이용하는 제어주기 및 데이터 송수신 방법을 보여준다. 그림에서 자세하게 타이머인터럽트를 이용하는 속도제어루틴 및 데이터 송수신 루틴과의 관계를 소개한다. 이 때 홀 신호를 이용하는 속도 검출 루틴이 속도제어 주기와 비동기적으로 연결되어 있음을 알 수 있다.

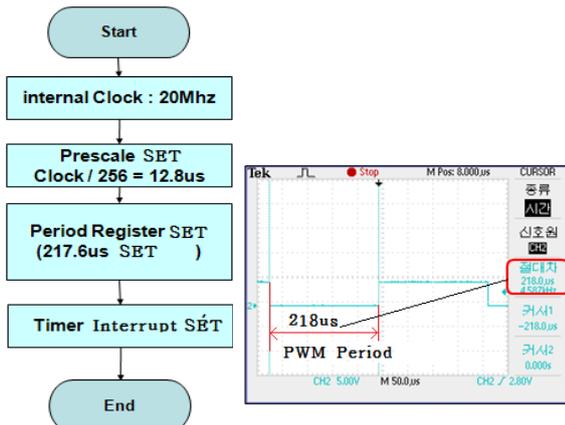


그림 10. PWM 및 속도 제어 주기 설정도 및 결과
Fig. 10. The flowchart and result of PWM and control interval

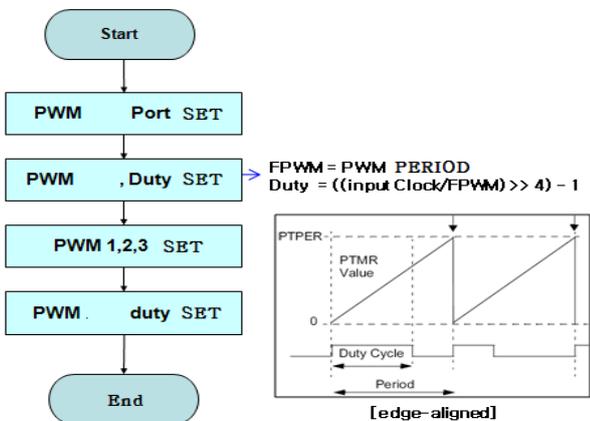


그림 11. PIC 내부 PWM 모듈의 사용
Fig. 11. The usage of PWM module in the PIC

내부 20Mhz 클럭을 256 체배하여 12.8us의 기본 시간을 설정하였으며, 이를 다시 타이머를 이용하여 217.6us(약 0.2ms)의 PWM 듀티 및 속도제어 주기를 발생하도록 하였다. 결국 PWM 주파수는 그림10과 같이 약 5kHz의 주기를 가지며, 듀티는 1/500의 분해능을 갖도록 설정하였다. 그림 11은 PIC 내부 PWM 발생 모듈의 세팅에 대한 소개이며, 서로 상보적으로 동작하는 PWM1, 2, 3를 이용하는 MOSFET 인버터 구동 신호 발생 모습을 보인다. 인버터 구동 시 많이 활용하는 테드타임은 고려되지 않고 있다.

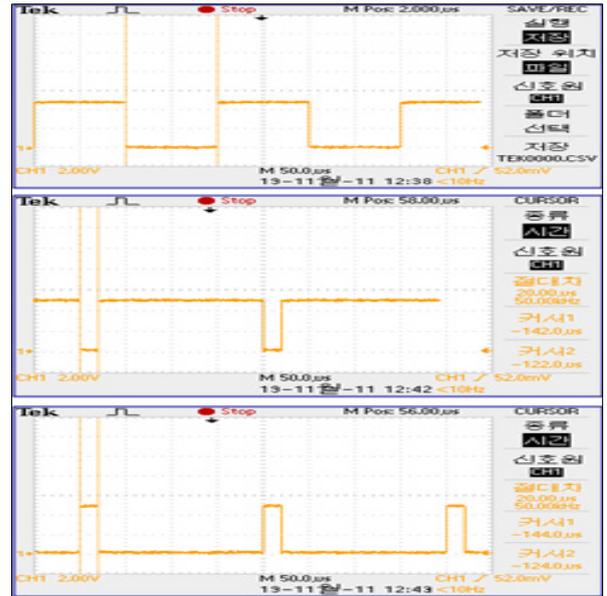


그림 12. PWM 듀티 발생 모습(50%, 90%, 10%)
Fig. 12. The shape of PWM duty made (50%, 90%, 10%)

그림12는 PIC 내부 PWM 발생 모듈에 의해 발생하는 PWM 펄스의 다양한 모습이다. 이 펄스에 의해 인버터의 각 상을 여자하는 스위치의 온/오프가 이루어지므로 이 스위치를 여는 정도가 모터의 구동력 증감을 제어하게 된다. PWM 듀티는 속도오차를 근거로 PDFF 제어 기법에 의해 결정된다.

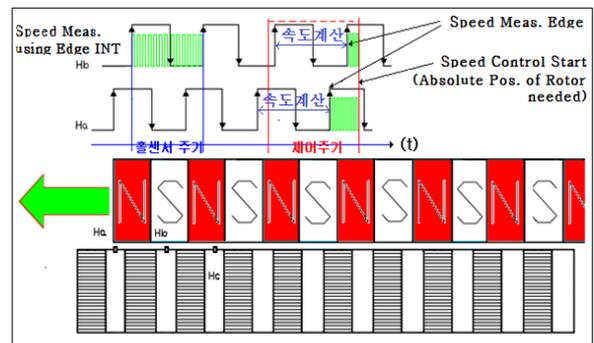


그림 13. 홀센서 신호와 홀 자극 검출 센서
Fig. 13. The hall magnet sensing sensor and output signal

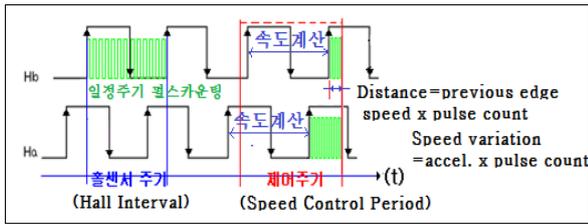


그림 14. 홀센서 신호와 카운터를 이용하는 절대위치 계산
 Fig. 14. The calculation of absolute rotor position using hall signal and counter

홀 신호를 이용하는 절대 위치 판별 방법은 개선된 방법을 사용하였다. 기존의 절대위치 측정 방법은 그림13과 같이 전류 제어주기 시작점에서 이전 홀센서 엣지와 그 이전 엣지 사이의 인터럽트를 통한 기준펄스 카운팅을 통해 먼저 최근의 속도 정보를 얻은 후, 이 속도정보와 최근 엣지와 전류제어 개시 시점 사이의 기준 펄스 카운팅 수(시간정보)를 이용하여 절대위치를 추정하는 방법이다. 개선된 절대위치 측정 방법은 그림14에서와 같이 전류 제어주기 시작점에서 이전 홀센서 엣지에서의 속도와 가속도를 이용하여 회전자 절대 위치를 보다 정확하게 추정하는 방법이다. 즉 기존의 이전 엣지 속도를 현재 속도라고 가정하고 위치 변화를 구하기보다 현재 속도를 가속도를 이용하여 좀 더 정확히 추정한 후 현재 위치 변화를 예측하는 방법이다.

$$Acc(k) = [\omega_{sen(k)} - \omega_{sen(k-1)}] / H_{period} \quad (1)$$

$$AP(k) = [\omega_{sen(k)} + Acc(k) \times NCCount(k)] \times NCCount(k) \quad (2)$$

- $\omega_{sen(k)}$: 최근 홀신호 엣지에서의 속도(rad/s)
- $\omega_{sen(k-1)}$: 최근 이전의 홀신호 엣지에서의 속도
- $Acc(k)$: 최근 가속도, H_{period} : 홀신호 주기
- $NCCount(k)$: 최근 홀신호 엣지에서 속도제어주기 시작까지의 기준펄스 수
(최근 홀신호 엣지와 제어주기 사이 시간)
- $AP(k)$: 추정된 회전자 절대 위치의 증감

실제 인버터의 스위칭 신호는 직구동 모터를 2상 여자 6스텝으로 구동하기 위해 하위 스위치에 시퀀스 스텝 여자 구동 신호가 인가되며, 상위 스위치는 스텝 여자 구동 신호에 속도제어 듀티 가변 신호가 더해져 인가된다. 즉 상위 스위치의 개폐 정도를 통해 세부 속도를 제어하게 된다. 아래 그림15, 16에 이러한 스위칭 신호들이 인가되는 모양과 듀티 가변 신호가 스텝 신호와 혼합되는 모양을 보인다.

2상 여자 6스텝 구동은 다극(56극) 모터인 월인 모터의 구동에는 적절한 것으로 생각되며, 데드타임 인가의 필요성이 없는 소프트웨어적으로 간단히 구현될 수 있는 방법이다. 즉 그림 16과 같이 모터의 3상 권선에 1에서 6까지의 순서로 60도 간격의 합성 자계가 가해지도록 그림16의 인버터 스위치를 이용하여 여자시키는 방법이다. 이 때 홀 자극

센서에 의해 얻어지는 회전자 자극의 절대 위치에 따라 최적의 여자 시퀀스를 가해줘야 한다. 프로세서에서는 홀센서의 절대위치 정보를 지능적으로 얻어내고 6개의 인버터스위치를 적절하게 온/오프하는 제어 신호를 주기적으로 발생시켜야 한다.

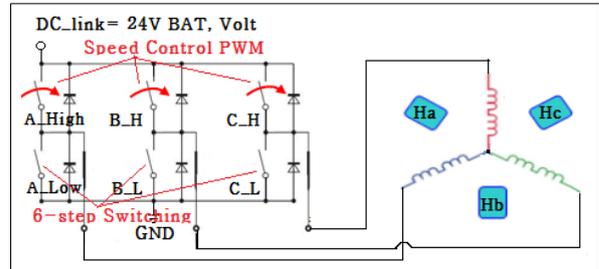


그림 15. 속도제어를 위한 상단 인버터 스위칭과 6스텝 구동을 위한 하단 스위칭 전략도
 Fig. 15. The switching pattern of inverter for high side switch and lower side switch

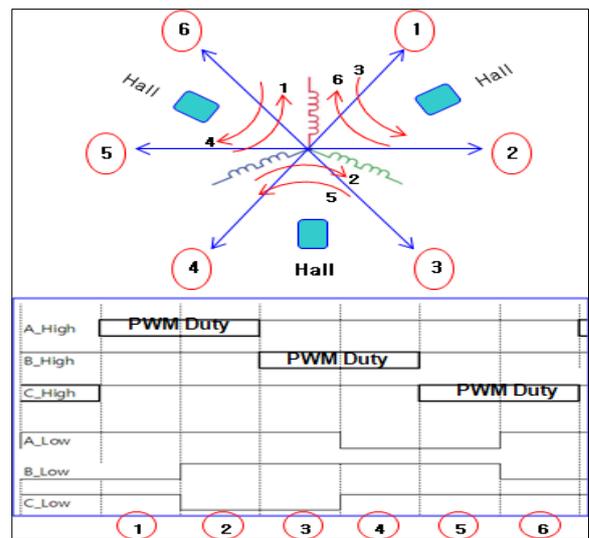


그림 16. 인버터 6스텝 구동 및 속도 제어를 위한 PWM 듀티 발생 전략

Fig. 16. The strategy of PWM signal for inverter six step driving and speed control

마지막으로 속도제어에 활용한 PI 제어 방법에 대해 소개한다. 사용한 방법은 전통적인 PI 제어 방식과 다르게 기준명령 신호와 출력 궤환 신호 각각에 다른 비례 이득을 적용하는 PDFF 전류제어 방법이다. 이 제어 방법은 오버슈트 제거에 효과적이다[6].

$$PWM_{duty} = (K_i/s)w_{error}(s) + K_{pr}w_{ref}(s) - K_{pf}w_e(s) \quad (3)$$

[K_{pr} : 속도지령기반비례이득, K_{pf} : 궤환 각속도기반비례이득, K_i : 속도제어 적분이득, w_{ref} : 속도지령, w_{error} : 속도오차]

PI 제어 기법은 기존의 성능이 확인된 PDFF 제어 기법을 사용하였지만 속도 제어 출력을 가지고 전류제어를 수행하는 대신에 속도제어 출력에서 바로 전압 지령(PWM듀티)을 만드는 방법을 제안하였다. 이 방법은 정밀 서보에서보다는 동력 구동용의 저가 서보에 제어기의 연산 부담을 줄이면서 쉽게 적용되어질 수 있는 방법이다.

4. 속도제어 실험 결과

그림17, 18은 설계된 제어기 및 인버터를 사용하여 속도제어를 수행한 결과들을 보여준다. 모터의 정격 속도는 200RPM이며, 6스텝 2상여자의 방법으로 구동되었으며, PDFFI 속도 제어기를 구성하여 PWM 전압제어를 수행하였다. 속도 오차를 근거로 PI 제어기를 설계하고 제어기의 출력이 바로 PWM 듀티가 되도록 소프트웨어 프로그램을 작성하여 제어기를 구동하였다.



그림 17. 350rad/s(120rpm) 속도지령에 대한 응답 특성

Fig. 17. The speed response for 350rad/s(120rpm) speed command

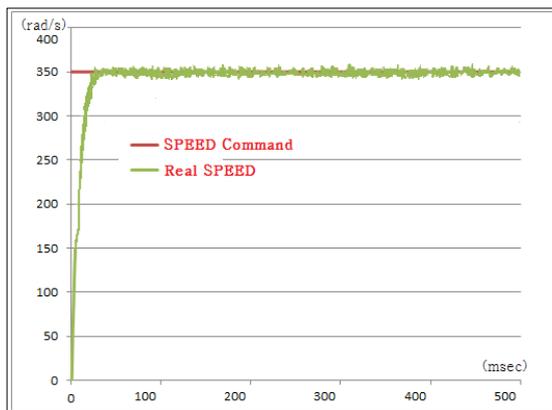


그림 18. 350rad/s(120rpm) 속도 지령에 대한 개선된 응답 특성

Fig. 18. The improved speed response for 350rad/s(120rpm) speed command

그림18은 개선된 절대위치 측정법 및 속도 필터를 사용하는 경우의 속도 응답 특성을 보여주고 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서 제안한 휠인 모터 구동을 위한 내장형 제어 계측시스템의 특성을 소개하면 아래와 같다.

첫째, 모션제어전용의 지능형 프로세서인 dsPIC30F2010을 이용하여 고가의 외부 하드웨어를 배제하면서 제어 및 홀 계측 시스템을 간략화 하였다.

둘째, 다극 휠인 모터의 절대위치를 개선된 가변주기 측정 방법으로 추정 계측 하여 제어의 정확성을 높였다.

셋째, 전류제어 루틴 없이 속도제어기에서 바로 PWM 듀티 신호를 내보내는 간략한 PDFF 제어기법을 채택하여 제어기의 연산 부담을 줄였다.

향후 연구 방향으로서는 개발된 모터 구동제어기를 채택하는 2륜 또는 3륜 구동 전기 차량 시스템을 설계하며, 특히 2륜 구동의 경우 자율 균형의 안정화 구동 알고리즘을 모터제어기에 탑재시켜 시스템의 완성도를 높이고자 한다.

References

- [1] Texas Instruments, "TMS320F28335 Peripherals Reference Guide", June 2013
- [2] Microchip, "dsPIC30F2010 Data Sheet, High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers", Microchip Technology Inc. , 2011.
- [3] Ph.K. Sattler and K. Starker, "Estimation of Speed and Pole Position of an Inverter Fed Permanent Excited Synchronous Machine," *EPE Conf. Rec.*, pp. 1207-1212,1989.
- [4] Microchip, "dsPIC30F Programmer's Reference Manual", Microchip Technology Inc. , 2003
- [5] Tae Jong Kang, "The Design of a Motion Controller Using the 16-bit Micro-controller dsPIC30F2010 specified to motor control", Changwon National Univ. Graduate School, 2011.
- [6] D.Y,Ohm, "A PDFF Controller for Tracking and Regulation in Motion Control," *Proceeding of 18th PCIM Conference, Oct.21-26, 1990.*
- [7] Jung-Shik Kong, Seung-Yub Baek, "Design of the Power Assist Controller for the In-Wheel Type Smart Wheelchair", *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems* Vol. 21, No. 1, pp. 80-85, 2011.02
- [8] Dong Won Kim, Yugay Igor, Eun Seok Kang,

Seul Jung, "Design and Control of an Omni-directional Cleaning Robot Based on Landmarks", *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems* Vol. 23, No. 2, pp. 100-106, 2013.04

- [9] Se-Han Lee, Sang-Yong Rhee, "A Controller Based on Velocity Estimator for a Wheeled Inverted Pendulum Running on the Inclined Road", *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems* Vol. 21, No. 3, pp. 283-289, 2011.06
- [10] Dong-Hyuk Jeong, Bo-Hoon Lee, Yong-Tae Kim, "Obstacle Avoidance Algorithm of Hybrid Wheeled and Legged Mobile Robot Based on Low-Power Walking", *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems* Vol. 22, No. 4, pp. 448-453, 2012.08

저 자 소 개



최중경(Jung-Keyng Choi)

1986년 : 고려대학교 전기공학과 공학사
1988년 : 고려대학교 전기공학과 공학석사
1992년 : 고려대학교 전기공학과 공학박사
1992년~현재 : 국립 창원대학교 전기전자
제어공학부 전자전공 교수

관심분야 : measurement, intelligent control, servo motor control, electronic circuit design

Phone : +82-055-213-3655

E-mail : cjk@changwon.ac.kr