

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.6.71>

IIBC 2015-6-10

다중 모터 제어를 위한 제어기 스케줄링 및 성능 분석

Controller Scheduling and Performance Analysis for Multi-Motor Control

권재민*, 이경중**, 안현식***

Jae-Min Kwon*, Kyung-Jung Lee**, Hyun-Sik Ahn***

요약 다중 모터를 효과적으로 제어하기 위하여 신호 측정 및 제어 알고리즘 수행 관련 스케줄링 방법을 제안하고 제어 성능을 검토한다. 차량 내 전자제어시스템과 연계되어 동작하는 다중 모터 제어기는 CAN(Controller Area Network) 통신을 통하여 위치/속도 지령 값을 전달 받고 각 모터에 대한 위치/속도 제어, 전류 제어 등을 수행한다. 하나의 마이크로컨트롤러를 이용하여 다수 대 모터를 효과적으로 제어하기 위하여 내부 자원과 알고리즘 수행에 대한 적절한 스케줄링이 중요하다. ADC(Analog to Digital Converter) 타이밍과 제어 알고리즘 수행 타이밍을 다양하게 변화시키며 실제 실험을 통하여 다중 모터 제어기의 성능을 분석한다.

Abstract In this paper, we propose a scheduling method for signal measurement and control algorithm execution in a multi-motor drive controller. The multi-motor controller which is used for vehicle control receives position/velocity command and performs position/velocity control and current control. Internal resource allocation and control algorithm execution timing are very important when one microcontroller is used for multi-motor drives. The control performance of the velocity control system is verified by varying ADC(Analog to Digital Converter) conversion timing and algorithm execution timing using real experiments.

Key Words : Multi-Motor Control, Controller Scheduling, PMSM, Vector Control

1. 서 론

최근 차량 제어 기술이 고급화됨에 따라 기존의 기계식 또는 유압식 장치를 전자장치로 대체하려는 연구가 진행되고 있다. 기존의 장치는 응답성능 및 정확성이 떨어지며, 무거운 유압 시스템으로 설계 자유도 및 연비 효율이 낮아진다. 따라서 응답성능이 좋고 정밀 제어가 가능하며, 기존 장치보다 가벼워 설계 자유도 및 연비 효율을 향상시킬 수 있는 전자장치로 대체가 필요하다^{[1],[2]}.

차량 전자 제어 기술 중 능동 안전 시스템은 사고 발

생을 예방하기 위해 제동장치를 제어하여 차량의 안전을 향상시키는데 목적이 있다. 차량의 제동 제어는 유압 시스템을 통해 바퀴에 제동력을 발생시켜 수행된다. 그러나 전자장치로 대체된 차량의 경우, 모터를 구동하여 바퀴에 제동력을 발생시킨다. 이때, 차량 바퀴의 제동력이 정확한 타이밍에 생성되지 않으면 차량의 조향 및 능동 안전 시스템의 성능에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 EMB(Electro-Mechanical Brake)와 같은 전자식 브레이크를 사용하는 차량은 정확한 타이밍의 제동력 생성을 위해 다중 모터 제어가 필요하다^{[3],[4]}.

*준회원, 한일프로텍

**정회원, 국민대학교 전자공학과

***정회원, 국민대학교 전자공학과(교신저자)

접수일자: 2015년 8월 25일, 수정완료: 2015년 10월 7일

게재확정일자: 2015년 12월 11일

Received: 25 August, 2015 / Revised: 7 October, 2015 /

Accepted: 11 December, 2015

***Corresponding Author: ahs@kookmin.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Kookmin University, Korea

차량의 다중 모터 제어를 위해 모터 당 하나의 구동 ECU(Electronic Control Unit)를 할당하는 경우, 차량 내 필요로 하는 모터의 개수가 증가함에 따라 ECU 개수 또한 증가한다. 이에 따라 ECU들이 차지하는 공간, ECU간 통신을 위한 와이어 하네스에 필요한 공간 및 무게 등이 증가하고 비용도 늘어나는 단점이 있다. 그러나 하나의 ECU로 여러 개의 모터를 구동하면 이러한 문제를 해결할 수 있어 연비 및 신뢰성 향상을 기대할 수 있다^{[5][7][8]}.

본 논문에서는 다중 모터 제어 시스템에서 전류와 같은 아날로그 신호 측정, 제어 알고리즘의 수행 등에 관한 최적 스케줄러 설계 방법을 연구한다. 다수의 영구자석식 동기전동기(PMSM:Permanent Magnet Synchronous Motor)를 효과적으로 제어하기 위하여 ADC 타이밍, 자원 분배 방법 및 제어기 수행 타이밍이 제안된다. 또한 ADC 타이밍 및 제어기 수행 타이밍에 따른 모터 제어 성능을 분석하고, CPU 부하에 미치는 영향도 실험을 통해 확인한다.

II. 시스템 설계

본 연구의 실험에 사용되는 다중 모터 제어 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 다중 모터 제어기는 모터의 속도를 제어하는 속도 제어기와 모터의 토크를 제어하는 전류 제어기로 구성된다. 다중 모터 제어 시스템에서 속도 제어기의 속도 지령 값은 상위 제어기로부터 통신을 통해 입력받는다. 그리고 속도 측정값과 속도 지령 값에 대

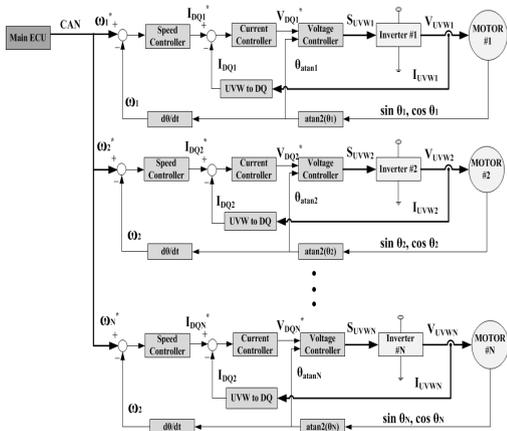


그림 1. 다중 모터 제어기 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of multi-motor controller

응하여 속도 제어기에서는 전류 제어기의 전류 지령 값을 출력한다. 또한, 모터의 3상 전류 측정값과 전류 지령 값에 대응하여 전류 제어기를 통해 회전자를 회전시키기 위해 필요한 d-q축 전압을 출력한다. d-q축 전압은 전압 제어기와 인버터를 거쳐 모터에 인가되며, 이러한 과정은 여러 개의 모터에 동시에 적용된다. 여러 개의 제어기 구조가 병렬로 구성되어 있기 때문에 모터의 속도는 독립적으로 제어된다^{[9],[10]}.

1. PMSM의 벡터제어

벡터제어는 기준자속의 위치를 측정 및 계산하고, 고정자 전류를 기준자속과 일치하는 성분인 d축과, 직교하는 성분인 q축으로 분해하여 각 성분을 독립적으로 제어하는 기법이다. d축 전류 성분을 일정한 크기로 유지시키고 q축 전류 성분의 크기만 조절하여 원하는 토크를 생성함으로써 직류모터와 유사하게 제어할 수 있다. 그림 2에 3상 좌표계와 d-q 직각 좌표계를 나타내었는데, d-q 변환 및 d-q 역변환을 통하여 각 좌표계에서의 전압 및 전류를 구할 수 있다.

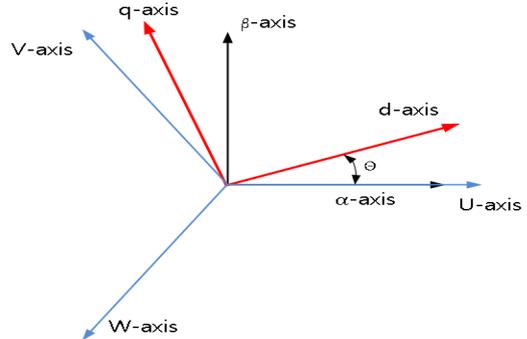


그림 2. 3상 좌표계와 dq 좌표계
Fig. 2. 3-Phase coordinates and dq coordinates

2. 속도 제어기

다중 모터 제어기 시스템의 속도 제어기는 PI 제어기를 사용하며, 제어기의 입력은 CAN 통신을 통하여 입력 받은 속도 지령 값과 각도 센서를 이용하여 계산되는 속도 측정값으로서 이를 표현하면 아래의 식(1)과 같다. 여기서, I_{ref} , V_{ref} , V_{act} 는 각각 전류 제어기 전류 지령 값, 속도 지령 값, 속도 측정값이고, K_{ps} 및 K_{is} 는 각각 속도 제어기의 비례 이득 상수, 적분 이득 상수이다.

$$I_{qref} = (K_{ps} + \frac{K_{is}}{s})(V_{ref} - V_{act}) \quad (1)$$

3. 전류 제어기

다중 모터 제어기 시스템의 전류 제어기도 PI 제어기를 사용하며, 제어기의 입력은 속도 제어기에서 출력된 전류 제어기의 전류 지령 값과 d-q축 전류 측정값으로서 이를 표현하면 아래의 식(2)와 같다. 여기서, V_{dq} , I_{dqref} , I_{dqact} 는 각각 d-q축 전압 값, 전류 제어기 전류 지령 값, d-q축 전류 측정값이고, K_{pc} 및 K_{ic} 는 각각 전류 제어기의 비례 이득 상수, 적분 이득 상수이다^[11].

$$V_{dq} = (K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s})(I_{dqref} - I_{dqact}) \quad (2)$$

III. 개발 시스템 개요

1. 하드웨어 설계

향후 다중 모터 제어기는 BBW(Brake-By-Wire) 시스템에서 기본적으로 적용될 것이며 이를 위한 차량 내 네트워크를 CAN 통신으로 가정하여 다중 모터 제어 시스템을 설계한다. 다중 모터 제어기 ECU의 기능 블록도는 그림 3과 같으며 CAN 통신을 기반으로 한 제어기 뿐만 아니라 FlexRay 통신을 기반으로 한 제어기도 구현하기 위해 CAN 통신과 FlexRay 통신이 모두 지원되는 32비트 마이크로컨트롤러를 선정한다.

하나의 PMSM에 벡터제어를 적용하였을 때 원하는 성능을 얻기 위해 전류제어 주기마다 3상 전류의 d-q축 변환과 d-q축 역변환이 수행되어야 한다. 다중 모터 제어기 구현을 위한 연산, ADC 성능 및 지원 네트워크 등을 종합적으로 고려하여 제어기에는 Infineon 사의 32비트 마이크로컨트롤러인 TC1797를 선정한다.

다중 모터 제어기 ECU는 TC1797, 인버터 회로부, 3상 모터 드라이버, CAN 트랜시버 및 5V/3V 레귤레이터로 구성된다. 각 3상 모터 드라이버는 TC1797의 타이머인 GPTA 모듈을 통해 출력되는 6개의 PWM을 입력받아 인버터 회로부로 전달하며, 인버터 회로부는 6개의 PWM을 입력받아 모터 구동에 필요한 3상 전압을 생성한다. 다중 모터 제어를 위해서 3상 모터 드라이버와 인

버터 회로부가 모터의 개수만큼 필요하다. 또한 TC1797의 MultiCAN 모듈을 이용하여 상위 ECU로부터 지령 값을 전달받는다.

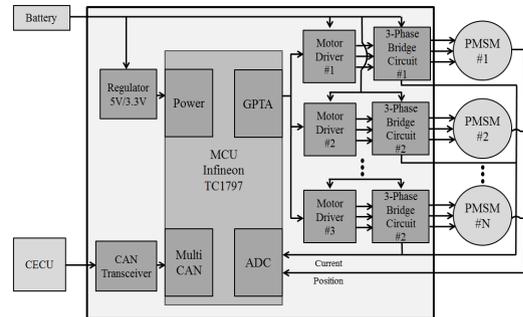


그림 3. 다중 모터 제어기 ECU 기능 블록도
 Fig. 3. Function diagram of multi-motor controller ECU

2. 디버깅 및 모니터링 시스템 구축

본 논문에서는 ECU 내부의 각종 상태를 확인하고 속도 및 전류 지령 값을 줄 수 있도록 그림 4와 같이 CAN 통신을 사용하여 시스템을 구축한다. CAN 통신으로 전송되는 모터의 속도 및 전류 지령 값 그리고 속도 및 전류 측정값 등 여러 신호들을 확인하기 위해 CAN 모니터링 툴을 사용한다. 다중 모터 제어를 수행하는 중에 MCU를 정지시키지 않고 시스템을 실시간으로 확인할 수 있는 디버깅 시스템과 모니터링 시스템을 구축한다.

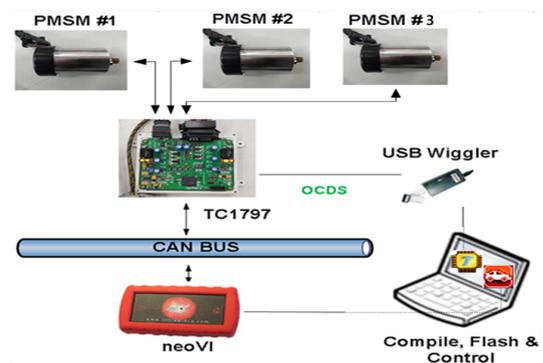


그림 4. 삼중 모터 제어기 개발 환경
 Fig. 4. Development Environment of Triple-Motor Controller

IV. 소프트웨어 구현

다중 모터 제어 알고리즘 수행 패턴은 기본적으로 그림 5와 같으며, 다수의 PMSM에 적용되는 모터 제어 알고리즘은 각각의 제어 주기 안에 수행된다. 제어 알고리즘에서 계산되는 PWM 듀티비는 다음 제어주기에 적용되며, 제어 알고리즘에서 필요한 전류 및 회전자의 위치 값 측정(ADC)과 제어기 ECU에 속도 및 전류 지령 값의 전달(CAN)은 전류 제어 주기 내에 수행된다.

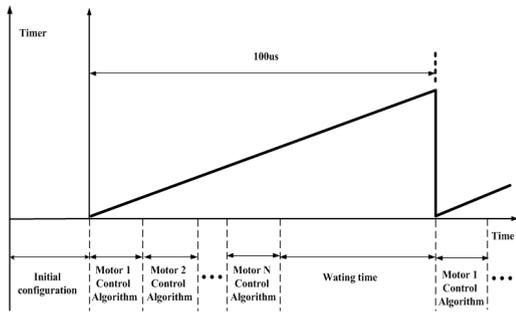


그림 5. 다중 모터 제어 알고리즘 수행 시간 타이밍도
Fig. 5. Time diagram of multi-motor control algorithm

본 논문에서 사용한 TC1797은 일반 타이머 GPTA (General Purpose Timer Array)의 LTC(Local Timer Cell)를 활용하여 다양한 PWM 신호를 생성할 수 있다. 그림 6에 중앙 정렬식 PWM(Center-Aligned PWM) 파형을 생성하기 위한 각 LTC의 설정 값들을 나타내었으며 각 상마다 2개의 PWM 파형이 요구되므로 8개의 LTC를 이용하여 스위칭 패턴 생성 및 데드타임 설정을 할 수 있다^{[12],[13]}.

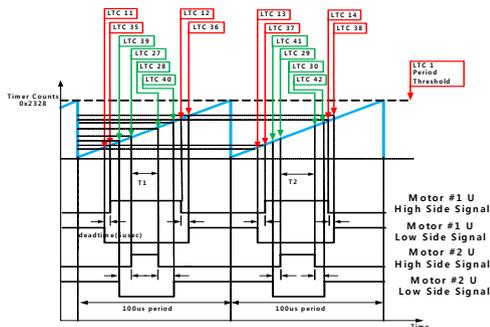


그림 6. 중앙 정렬식 PWM
Fig. 6. Center-Aligned PWM

일반적으로, 마이크로컨트롤러에 내장된 ADC 모듈은 다수의 채널을 갖고 있으나 대부분 하나의 커널에서 순차적으로 변환하는 방식을 사용하므로, 전류와 같이 응답속도가 빠른 경우에 가능한 한 다른 커널에서 변환하는 것이 효과적이다. TC1797은 2개의 ADC 모듈을 갖고 있으므로 각 모듈에서 두 상(U상, V상)의 전류를 동시에 측정하고 W상의 전류는 3상전류의 합이 0인 성질을 이용하여 구한다.

다수대 모터를 제어하는 경우에는 아날로그 신호를 모두 측정할 수도 있고 그림 7에 나타낸 단일 모터 제어에서와 마찬가지로 PWM 신호의 중앙에서 전류, 전압 및 각 위치 측정, 그리고 제어 알고리즘들을 집중적으로 수행할 수 있다. 그러나 PWM 신호에 동기를 정확하게 맞추고 아날로그 신호가 적절히 세틀링된 후 측정하는 것이 중요하다. 그림 8(a)와 8(b)에서는, PWM 신호주기의 중앙에서 전류 및 전압을 측정하는 것은 동일하나 각 모터에 대한 전류/속도 제어 알고리즘 수행 및 PWM 신호 출력의 순서를 다르게 하였고, 그림 8(c)에서는 각 모터 별로 전류/속도 제어 알고리즘 수행과 PWM 신호 출력이 독립적이며 순차적으로 이루어지는 경우를 고려한다. 모터의 개수가 증가함에 따라 ADC 타이밍은 조정될 필요가 있다.

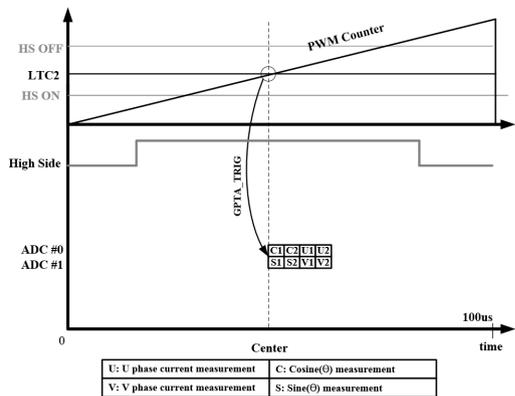


그림 7. 아날로그 신호 측정 타이밍
Fig. 7. Measurement timing of an analog signal

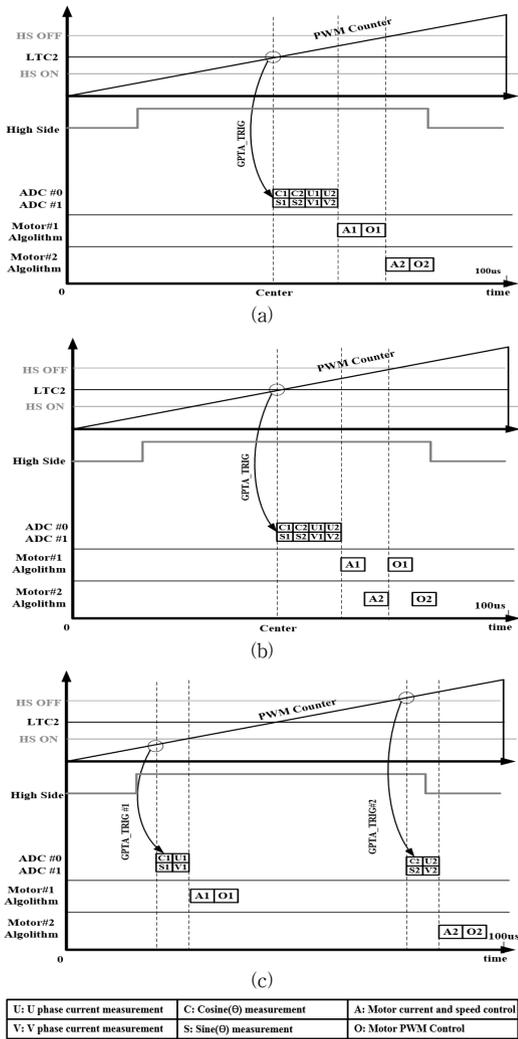


그림 8. ADC 및 제어 알고리즘 수행 타이밍 설계
 Fig. 8. Timing design of ADC and control algorithm execution

V. 실험 결과

모터 #1, #2 각각에 요구되는 ADC 타이밍에서 트리거 신호를 나타내면 그림 9와 같다. 그림 9(a)에서는 그림 8(a)의 방법을 적용함으로써 PWM 주기의 중앙에서 ADC 과정이 수행되는 것이 확인된다. 그림 9(b)는 그림 8(b)의 방법을 적용한 것이며 8(a)와 마찬가지로 PWM 주기의 중앙에서 ADC 과정이 수행된다. 그림 9(c)는 그림 8(c)에서의 방법이 적용되어 PWM 주기의 초반과 끝

부분에서 ADC 과정이 수행되며 각 모터마다 ADC 타이밍이 독립적으로 할당된다.

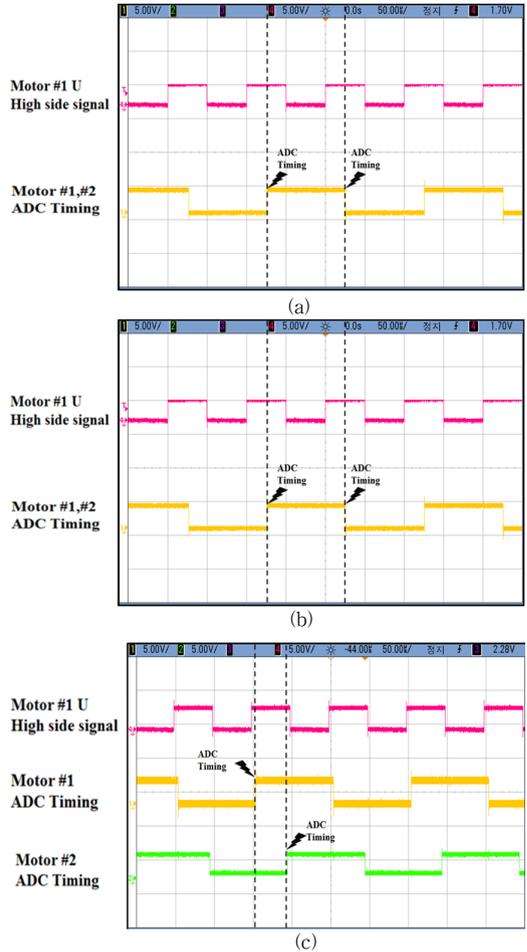


그림 9. ADC 타이밍 측정: (a) 그림 8(a) 적용 결과, (b) 그림 8(b) 적용 결과, (c) 그림 8(c) 적용 결과
 Fig. 9. Measurement of ADC timing: (a) Case of Fig. 8(a), (b) Case of Fig. 8(b), (c) Case of Fig. 8(c)

그림 10(a)~(c)는 각각 그림 8(a)~(c)의 방법을 적용한 실험결과로서 CAN 통신을 이용한 속도 지령 값은 100rpm이며 각 모터의 속도 응답이 대략 200ms 이후 정상상태인 것을 볼 수 있다. 그림 10(a)와 그림 10(b)에서 나타난 속도 제어 수행결과에는 거의 차이가 없으며, 속도 측정값이 지령 값의 90%에 도달하는데 걸리는 시간은 모터 1의 경우 약 160ms, 모터 2의 경우 약 170ms이다. 또한 CPU 부하는 약 39%로 측정 되었다. 그림 10(c)

에서 속도 측정값이 지령 값의 90%에 도달하는데 걸리는 시간은 모터 1의 경우 약 100ms, 모터 2의 경우 약 150ms이다. 그림 10(a), (b)에 비해 응답 속도가 10% 이상 향상되었으며, CPU 부하는 10% 정도 증가한 49%로 측정되었다. CPU 부하의 증가 원인은 모터 제어 소스 분리를 위해 생성한 인터럽트에 의한 추가적인 문맥전환 발생과 ADC 타이밍 분리를 위한 ADC 모듈 내 리퀘스트 소스 변경에 따른 시간 지연 발생 등이다.

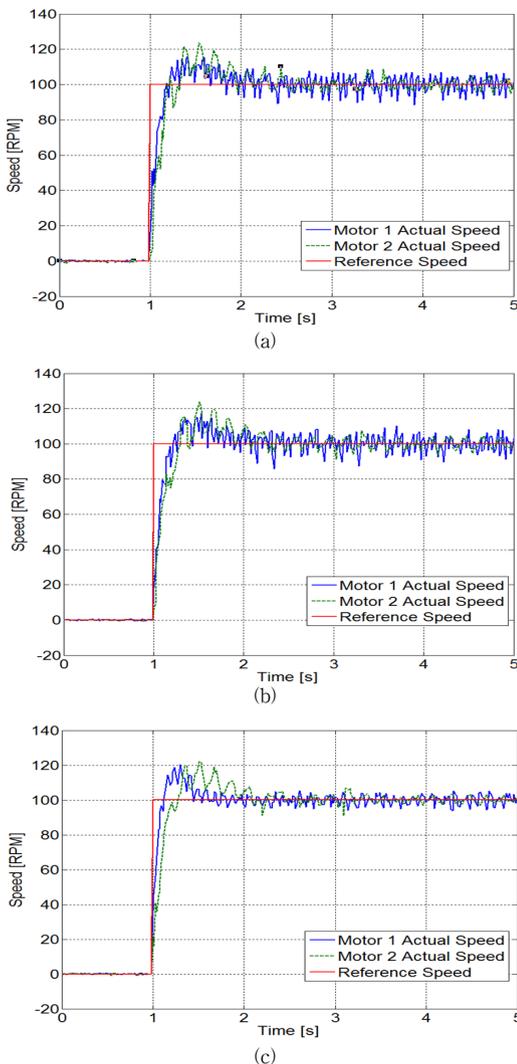


그림 10. 다중 모터 속도 제어 응답: (a) 그림 8(a) 적용 결과, (b) 그림 8(b) 적용 결과, (c) 그림 8(c) 적용 결과

Fig. 10. Multi-motor speed control responses: (a) Case of Fig. 8(a), (b) Case of Fig. 8(b), (c) Case of Fig. 8(c)

VI. 결론

본 연구에서는 하나의 마이크로컨트롤러를 이용하여 다수의 PMSM을 제어하는 다중 모터 제어를 구현하였다. 다중 PMSM을 제어하기 위해 Infineon TC1797의 ADC 모듈을 이용하여 ADC 타이밍 설계, ADC 자원 분배 방법을 제안하였다. 또한 각 모터의 백터 제어 기반의 속도 제어를 구현하고, ADC 타이밍 및 제어기 수행 타이밍 선정에 따라 모터 제어 성능의 차이와 CPU 부하의 영향을 실험을 통하여 확인하였다. 향후 EMB 시스템에 다중 모터 제어를 적용하여 2개 이상의 EMB 액츄에이터를 제어할 예정이다.

References

- [1] H. CHEN, X. GONG, Y-F HU, Q-F LIU, B-Z GAO, H-Y GUO, "Automotive Control: the State of the Art and Perspective," *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 4, April. 2013.
- [2] R. Isermann, "Mechatronic systems-Innovative products with embedded control," *Control Engineering Practice*, vol. 16, pp. 14-29, 2008.
- [3] S. Semmler, R. Isermann, R. Schwarz, P. Rieth, "Wheel Slip Control for Antilock Braking System Using Brake-by-Wire Actuators," *SAE Technical Paper 2003-01-0325*, 2003.
- [4] J. S. Cheon, "Brake By Wire System Configuration and Functions using Front EWB(Electric Wedge Brake) and Rear EMB(Electro-Mechanical Brake) Actuators," *SAE Technical Paper 2010-01-1708*, 2010.
- [5] V. T. Phan and H. H. Lee, "Dual Three-Phase Inverter Using a Single Processor to Drive Two Motors in Electric Vehicle Applications," *In Proc. Strategic Technology, The 1st International Forum on*, pp. 24 - 28, 2006.
- [6] W. Shireen and M. S. Arefeen, "Controlling Multiple Motors Utilizing a Single DSP Controller," *IEEE Trans. on Pow. Elec.*, vol. 18, no. 1, pp. 124-130, Jan. 2003.

- [7] M. S. Arefeen, K. Godbole and M. Konghirun, "Dual Field Oriented Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Drive Using a Single DSP Controller," in Proc. Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 649 - 653, Mar. 2006.
- [8] J. M. Kwon, K. J. Lee, H. S. Ahn, "Implementation of Multi-Motor Controller Based on a Single Microcontroller," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 15, no. 1, pp. 237-243, 2015.
- [9] Y. Matsumoto, C. Osawa, T. Mizukami, and S. Ozaki, "A stator-fluxbased vector control method for parallel-connected multiple induction motors fed by a single inverter," in Proc. IEEE APEC'98, vol. 2, pp. 575 - 580, 1998.
- [10] K. Matsuse, Y. Kouno, H. Kawai, and S. Yokomizo, "A speed-sensorless vector control method of parallel-connected dual induction motor fed by a single inverter," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 38, pp. 1566 - 1571, Nov./Dec. 2002.
- [11] S. H. Kim, DC, AC, BLDC Motor Control, Bogdo, 2010.
- [12] TC1797 User's Manual, Infineon Technologies AG, 2009.
- [13] "3-phase complementary Pwm with hardware triggered ADC conversion," Application Note AP32135, Infineon Technologies AG, 2009.

저자 소개

권재민(준회원)



- 2013년 2월 : 국민대학교 전자공학과 (학사)
- 2015년 2월 : 국민대학교 전자공학과 (석사)
- 2015년 ~ 현재 : 한일프로텍
<관심분야: 차량 전자 제어, 임베디드 SW>

이경중(정회원)



- 2012년 2월 : 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2012년 ~ 현재 : 국민대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야: 차량 전자 제어, 임베디드 SW, 로봇틱스 응용>

안현식(정회원)



- 1992년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학박사)
- 1993년 ~ 현재 : 국민대학교 전자정보통신공학부 교수
<관심분야: 지능형 로봇틱스, 차량 전자 제어>

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT융합 고급인력과정 지원사업(IITP-2015-H8601-15-1005) 및 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과로 수행되었음