

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.1.237>

IIBC 2015-1-31

단일 마이크로컨트롤러 기반 다중 모터제어기 구현

Implementation of Multi-Motor Controller Based on a Single Microcontroller

권재민*, 이경중*, 안현식**

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

요약 본 논문에서는 다중 모터 기반 피드백 제어 시스템에 대하여 캐스케이드 형태의 제어기를 고려하고 제한된 ADC(Analog to Digital Converter) 자원을 효과적으로 이용하기 위한 자원 할당 방법을 제안한다. 이 방법의 목적은 한정된 ADC 자원으로 모터 위치 측정값의 오차 및 d-q 축 전류 측정값의 오차를 최소화하는 것이다. 다중 모터 기반 피드백 제어 시스템에 대한 캐스케이드 제어 구조는 속도 제어기와 전류제어기로 구성되며, 이러한 구조가 각 모터에 병렬로 적용되어 각 모터의 회전 속도가 독립적으로 제어된다. 다중모터제어기는 추가되는 마이크로컨트롤러 없이 오직 하나의 컨트롤러에 구현된다. 다수의 AC 모터로 구성된 실험환경과 제안된 제어구조 및 ADC 할당방법을 이용함으로써 각 모터의 속도 및 토크가 주어진 속도 지령값을 정밀하게 추종함을 보인다.

Abstract In this paper, we consider a cascaded type of control architecture for a multi motor-based feedback control system and propose an ADC (Analog to Digital Converter) resource allocation method to efficiently utilize the limited ADC resources. The purpose of the resource allocation method is to minimize both the motor position measurement error and the d-q current measurement error. The cascaded type of control architecture is applied in parallel to each motor to independently control the speed of a motor in the multi motor control system. All the control algorithms are implemented by software using a single microcontroller without using additional microcontrollers. It is illustrated by experiments that the speed and the torque of each motor are controlled precisely by the proposed control architecture with the efficient ADC allocation method.

Key Words : Multi-Motor Control, PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor), Vector Control

1. 서 론

자동차 산업 전반에 걸쳐 점차 고급화 되는 차량 제어 기술에 대한 요구를 만족시키기 위해, 기존의 기계식 또는 유압식 장치를 모터와 전기전자장치로 대체하려는 연구가 활발히 진행 중이다. 모터가 적용된 전자식 액츄에이터는 유압시스템 보다 응답성능 및 정확성이 우수하며,

복잡하고 무거운 유압 시스템을 제거함으로써 자동차의 설계 자유도 향상과 연비 개선의 효과를 나타낸다^[1]. 또한 전자식 액츄에이터에 장착되는 여러 모터 중 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 높은 효율과 토크로 인하여 차량 제어 기술에 적용되기 적합하다^{[2][3]}.

차량 전자 제어 기술 중 DYC(Dynamic Yaw Control)

*준회원, 국민대학교 전자공학과

**정회원, 국민대학교 전자공학과(교신저자)

접수일자 : 2014년 11월 4일, 수정완료 : 2014년 12월 10일

게재확정일자 : 2015년 2월 13일

Received: 4 November, 2014 / Revised: 10 December, 2014

Accepted: 13 February, 2015

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

Dept. of Electronics Engineering, Kookmin University, Korea

와 같은 기존의 능동 안전 시스템들은 정확한 요 모멘트를 생성하여 차량의 조향을 안정적으로 제어한다. 이는 유압 시스템을 통해 하나의 혹은 다수의 휠에 제동력을 발생시킴으로써 작동한다. 모터가 적용된 전자식 액츄에이터를 사용하는 차량의 경우, 요 모멘트를 생성하는 과정에서 모터를 구동하여 제동력을 생성함으로써 응답의 속응성 및 정확성을 개선할 수 있다^[4].

차량의 안정적인 감속 및 조향을 위해서는 전류 또는 후륜의 제동력이 정확한 타이밍에 생성되어야 한다. 만약 제동력이 생성되는 타이밍에 오차가 발생한다면 예기치 않은 요 모멘트를 발생시켜 차량의 조향 성능과 DYC와 같은 능동 안전시스템의 성능에 영향을 미칠 가능성이 있다. 이를 해결하기 위해 EMB(Electro-Mechanical Brake)와 같은 전자식 브레이크를 사용하는 차량에서는 효율적인 다중 모터 제어가 필요하다.

차량 전자 제어 시스템에 적용된 다수의 모터들을 제어하는 방법은 여러 가지가 있는데, 우선은 모터당 하나의 프로세서를 할당하고 차량내 통신을 통해 메인 ECU에서 다수의 모터를 제어하는 것이다. 하지만 차량 내부에 장착되는 모터의 수가 계속 증가하는 추세에서 이러한 방법은 공간 활용도를 감소시키고 생산 비용을 증가시키는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 점을 보완하기 위하여 2개 이상의 모터를 하나의 마이크로컨트롤러로 구동하는 방법을 사용한다^[5]7].

또 다른 방법은 하나의 인버터로 여러 대의 모터를 일괄 구동하는 것이다. 이는 가격적인 측면에서 큰 장점을 갖고 있다. 하지만 동시에 병렬 구동되고 있는 모터들 간의 모터상수가 다를 경우, 벡터제어가 적절히 수행되지 않고 이에 따라 전체 시스템이 불안정해질 수 있다^[8]10]. 이러한 단점들을 제거하기 위해서는 모터당 하나의 인버터를 할당하여 모터의 벡터제어가 안정적으로 수행하도록 해야 한다.

본 논문에서는 32 비트 마이크로컨트롤러인 Infineon TC1797을 이용하여 다중 모터 제어를 구현한다. 모터는 PMSM을 사용하며, 각 모터에 하나의 인버터를 할당한다. 또한 다중 모터 제어 시스템을 구동하는 모든 제어 알고리즘은 추가되는 마이크로컨트롤러 없이 오직 하나의 컨트롤러에 소프트웨어적으로 구현된다.

II. 시스템 설계

여기에 본 논문에서 제안하는 다중 모터 제어기는 그림 1과 같은 제어구조를 가진다. 다중 모터 제어기는 속도 제어기와 전류 제어기가 캐스케이드 구조로 구성되며 각 모터의 속도와 토크를 제어한다.

다중 모터 제어 시스템의 속도 제어기는 메인 ECU로부터 CAN 통신을 통하여 속도 지령값을 입력받는다. 그리고 전달된 속도 지령값과 전기각의 미분을 통해 얻은 속도 측정값에 대응하여 전류 지령값을 출력한다. 전류 제어기는 모터의 3상 전류와 속도 제어기에서 출력된 전류 지령값에 대응하여, 회전자를 회전시키는데 필요한 d-q축 전압을 출력한다. 출력된 d-q축 전압은 전압 제어기와 인버터를 거쳐 모터에 적절한 전압이 인가되도록 한다. 이러한 과정은 두 개의 모터에 동시에 적용되며, 두 개의 제어기의 구조가 병렬형으로 구성되어 있기 때문에 모터의 회전 속도 또한 독립적으로 제어된다.

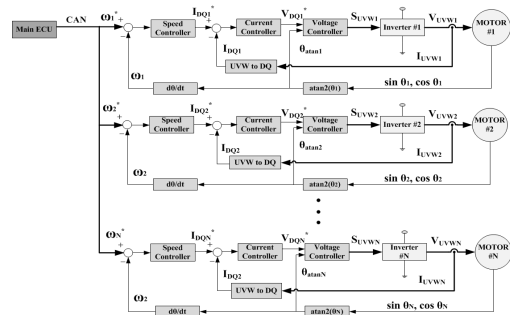


그림 1. 다중 모터 제어기 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of a dual motor controller

1. PMSM의 벡터제어

벡터제어는 모터의 전류성분을 토크성분과 자속성분으로 나눈 후, 속도 및 전류 지령값을 추종하도록 토크성분 전류만을 정밀하게 제어하는 방식이다. 릴럭턴스 토크 성분을 일정하게 하기 위하여, 자속성분 전류를 일정한 크기로 유지시킨다. 그리고 토크성분 전류의 크기를 제어함으로써, 모터의 속도 제어와 전류 제어를 위해 요구되는 토크를 생성한다.

PMSM의 구동시 영구자석이 공급하는 자속으로 인하여 자속성분 전류 기준값을 0으로 설정한다. 또한, PMSM은 회전자의 위치 및 속도가 회전자계의 위치 및 속도와 동일하다. 이에 따라 d-q 변환에 회전자계의 위치와 회전자의 위치 중 어느 것이든 사용가능하다.

그림 2에 3상 좌표계, 정지좌표계, 동기 좌표계를 나타

내었다. 3상 전류를 정좌표계로 변환하면 2상의 교류 성분으로 표현되며, 동기좌표계로 변환하면 d-q 축 전류는 2상 직류 성분으로 표현된다. 이렇게 변환된 d-q 축 전류를 제어하여 필요한 토크를 생성한다

PMSM의 d-q축 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \\ V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \end{aligned} \quad (1)$$

3상 좌표계 전압은 식 (1)의 d-q축 전압의 d-q축 역변환을 통하여 얻어진다. 이렇게 얻어진 3상 좌표계 전압은 MCU에서 출력되는 PWM을 통하여 구현된다. d-q축 전류는 3상 좌표계 전류를 d-q축 변환하여 측정한다.

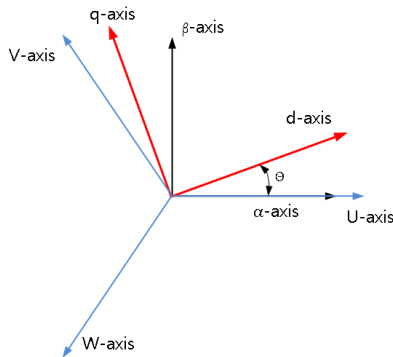


그림 2. 3상 좌표계와 DQ 좌표계
 Fig. 2. 3-Phase coordinates and DQ coordinates

모터의 최고자속을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + \Phi_f \cos(\theta - \theta_r) \\ \lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + \Phi_f \sin(\theta - \theta_r) \end{aligned} \quad (2)$$

3상 좌표계 변수를 모터의 동기 좌표계 변수로 변환하는 식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_d &= -i_v \sin\theta - i_w \left(\frac{1}{2} \sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\theta \right) - i_u \left(\frac{1}{2} \sin\theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\theta \right) \\ i_q &= i_u \cos\theta + i_v \left(\frac{1}{2} \cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\theta \right) + i_w \left(\frac{1}{2} \cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\theta \right) \end{aligned} \quad (3)$$

요구되는 토크의 크기에 따라 d-q축 전류의 제어가 완료된 후, 동기 좌표계 변수를 3상 좌표계 변수로 d-q축 역 변환한다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} i_{us} &= i_{ds} \cos\theta - i_{qs} \sin\theta \\ i_{vs} &= i_{ds} \left(-\frac{1}{2} \cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\theta \right) + i_{qs} \left(\frac{1}{2} \sin\theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\theta \right) \\ i_{ws} &= i_{ds} \left(-\frac{1}{2} \cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\theta \right) + i_{qs} \left(\frac{1}{2} \sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\theta \right) \end{aligned} \quad (4)$$

d-q축 전류와 모터의 토크 관계식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \Phi_f i_{qs} \quad (5)$$

식 (5)의 q축 전류는 요구되는 토크의 크기에 의해서 결정된다.

모터의 3상 좌표계 전류의 합은 이상적으로 0이 되어야 하며, 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$i_u + i_v + i_w = 0 \quad (6)$$

U상 전류와 V상 전류의 값을 알고 있으면, 식(6)을 통해 W상 전류를 구할 수 있다^[11].

III. 개발 시스템 개요

1. 하드웨어 설계

본 논문에서 제안하는 다중 모터 제어기 ECU의 기능 블록도는 그림 3과 같다.

향후 다중 모터 제어기는 BBW(Brake-By-Wire) 시스템에 적용되며, 이를 위한 차량 내 네트워크를 CAN으로 가정하고 제어기를 설계하였으며 향후 FlexRay에 기반한 제어기 구현을 위해 CAN과 FlexRay가 모두 지원되는 Infineon 사의 32 비트 마이크로컨트롤러인 TC1797로 채택한다.

또한 하나의 PMSM에 벡터 제어를 적용 하였을 때 원하는 성능을 얻기 위해서는 전류 제어주기마다 3상 전류의 d-q 변환과 d-q 역변환이 수행되어야한다. 2개 이상의 PMSM 제어를 위해서는 하나의 PMSM 제어에 필요한 연산의 2배 이상의 연산이 필요하게 되므로 고성능 마이크로컨트롤러가 필요하다. 따라서 다중 모터 제어기

구현을 위한 연산성능, ADC 성능 및 지원 네트워크 등을 종합적으로 고려한 후 제어기의 마이크로컨트롤러를 Infineon 사의 32 비트 마이크로컨트롤러인 TC1797로 선정한다.

다중 모터 제어기 ECU는 선정 마이크로컨트롤러인 TC1797 기반으로 구성되며, PMSM 구동을 위한 인버터 회로부와 3상 모터 드라이브, 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 모터제어를 위해서는 3상 모터드라이버와 인버터 회로부가 제어하는 모터의 개수만큼 장착되어야 한다. 또한 TC1797의 MultiCAN 모듈을 이용하여 상위 ECU로부터 지령값을 전달받으며, 이 과정에서 CAN 트랜시버가 사용된다^{[12][13]}.

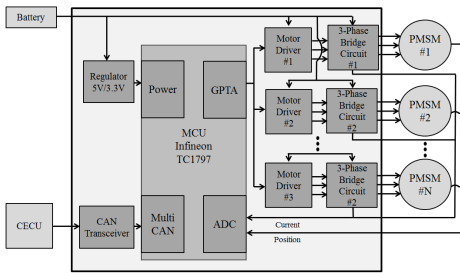


그림 3. 다중 모터 제어기 ECU 기능 블록도
Fig. 3. Function diagram of multi motor controller ECU

2. 제어기 개발 환경

본 논문에서는 그림 4와 같이 다중 모터 제어를 위하여 CAN 통신을 사용함으로써 ECU 내부의 각종 상태를 확인하고 전류, 속도 및 전압 지령값을 줄 수 있도록 시스템을 구축하였다. 또한 CAN 모니터링 툴을 사용하여 CAN으로 전송되는 모터의 속도 지령값, 전류 지령값, 속도 측정값 및 전류 측정값 등 각종 신호를 시각적으로 확인할 수 있도록 한다.

다중 모터 제어를 수행하는 도중에 MCU 동작을 디버깅 목적으로 스톱시키는 경우에 스위칭 패턴을 생성하는 PWM 신호 생성도 중단된다. 이때 모터들은 심각한 손상을 입을 수 있다. 따라서 제어기 개발을 효과적으로 진행

하기 위하여 MCU 동작의 스톱 없이 시스템 내부 상태를 실시간으로 확인하며, 또한 가시적으로 확인할 수 있는 디버깅 시스템과 모니터링 시스템을 구축한다.

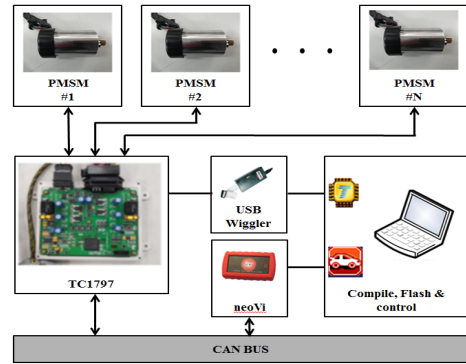


그림 4. 다중 모터제어기 개발 환경
Fig. 4. Development environment of multi Motor controller

IV. 소프트웨어 구현

1. 다중 모터 제어

다수의 PMSM에 적용되는 모터 제어 알고리즘은 그림 5와 같이 각각의 제어주기 안에 수행된다.

제어 알고리즘을 통해 얻은 PWM 듀티비는 다음 제어주기에 적용된다. ADC, CAN 통신 수행을 위한 시간은 전류 제어 주기 내에 배분된다. ADC는 제어 알고리즘을 적용하는데 필요한 전류 및 회전자 위치값을 실시간으로 측정한다. 또한 CAN 통신을 통해서 제어기 ECU에 속도 및 전류 지령값을 전달하며 이 값은 다음 제어 알고리즘에 사용된다.

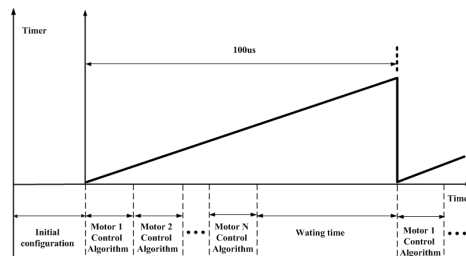


그림 5. 다중 모터 제어 알고리즘 수행 시간 타이밍도
Fig. 5. Time diagram of multi motor control algorithm

2. 아날로그 신호 측정방법

대부분의 마이크로컨트롤러의 ADC 모듈은 하나의 모듈에서 다수의 채널을 지원한다. 그러나 모터 제어에서는 전류 측정이 동시에 이루어지지 않으면 d-q축 전류 측정값에 오차가 발생할 수 있으므로 독립된 ADC 모듈들을 사용하여 동시에 3상 전류를 측정한다. 하지만 이 방법의 경우, 2개 이상의 3상 PMSM 모터 제어를 위해서는 6개 이상의 ADC 모듈을 사용해야 하므로 경제성이 떨어지고 3개의 ADC 모듈만을 지원하는 TC1797로는 다중 모터 제어기의 구현이 불가능하다. 이 대안으로 ADC 모듈마다 여러 개의 채널을 사용해서 센서 출력을 측정한다.

2개 모터의 3상 전류 측정을 위해서 최소 6개의 ADC 채널이 필요하다. 또한 로터리 위치센서 사용 시 위치 측정을 위해 4개의 ADC 채널이 필요하다. 하지만 U, V, W 상 전류의 합이 0인 특성을 이용하여, 하나의 상 전류는 연산을 통하여 구할 수 있다. 이에 따라 전류 측정에 필요한 ADC 채널을 4개로 줄일 수 있다.

그림 6에 한정된 ADC 자원 내 아날로그 신호 측정 방법을 나타내었다. 모터의 상 전류의 경우에 PWM 스위칭 패턴 동안 계속 변하기 때문에 전류가 측정되는 시점에 따라 전류 측정값이 크게 변동될 수 있다. 따라서 ADC는 PWM 파형과 정확히 동기화하여 변환한다. 아날로그 신호 측정 시간을 PWM과 동기화하기 위하여 LTC2 또는 LTC3의 컴퍼어 매치 이벤트를 통하여 ADC 모듈을 트리거한다. 트리거 타이밍은 변경이 가능하며, 해당 모듈내에서 ADC 채널을 정의하고 트리거 이벤트가 발생하면 ADC과정을 진행하는 리퀘스트 소스에 의하여 분리될 수 있다. 또한 하나의 모듈로 모터의 3상 전류를 측정할 경우에 채널당 1.5 us 에 타이밍 지연이 발생하기 때문에, 각 상 전류 측정에 있어서 ADC 모듈 0에 모터의 U상 전류를 할당하고 ADC 모듈 1에 모터의 V상 전류를 할당한다. 이에 따라 지연 시간이 제거되고 U상, V상 전류가 동시에 측정 가능하다. 또한 각 모터의 위치 측정값 오차를 제거하기 위하여 모듈당 하나의 위치센서 출력을 할당한다. 위치 센서의 출력은Cosine(θ) 출력과 Sine(θ) 출력으로 나누어진다. Cosine(θ) 출력과 Sine(θ) 출력을 동시에 측정하지 않는다면 atan 연산을 통해 계산되는 모터 회전자의 위치값에서 측정 지연에 따른 오차가 발생하므로, Cosine(θ)

출력과 Sine(θ) 출력을 ADC 모듈 0과 ADC 모듈 1에

각각 할당한다.

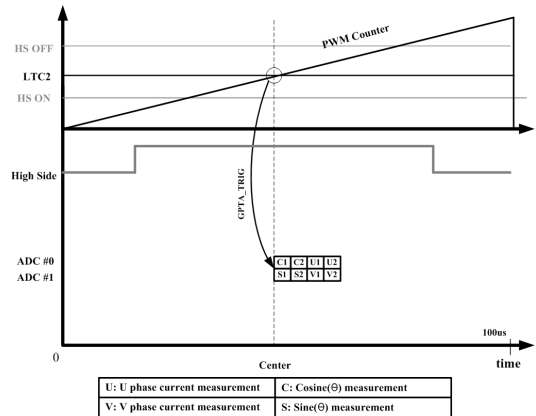


그림 6. 아날로그 신호 측정방법
 Fig. 6. Measurement method on analog signals

V. 실험 및 결과

그림 7에 다중 모터 제어기의 ADC 모듈들이 실제로 ADC 과정을 수행하는 타이밍을 나타내었다. GPTA 모듈의 LTC2 또는 LTC3을 이용하여 ADC 모듈을 트리거 하였으며, 그 결과 설계된 타이밍에 ADC 과정이 수행된다.

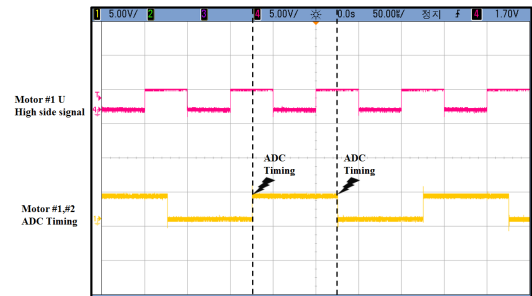


그림 7. ADC 타이밍 측정
 Fig. 7. Measurement of ADC timing

다중 모터 제어기 내 속도 제어기 수행 결과는 그림 8과 같다. 100 RPM 또는 200RPM의 속도 지령값을 주었을 경우에 200ms 이내에 각 모터의 속도 측정값이 지령값을 추종한다.

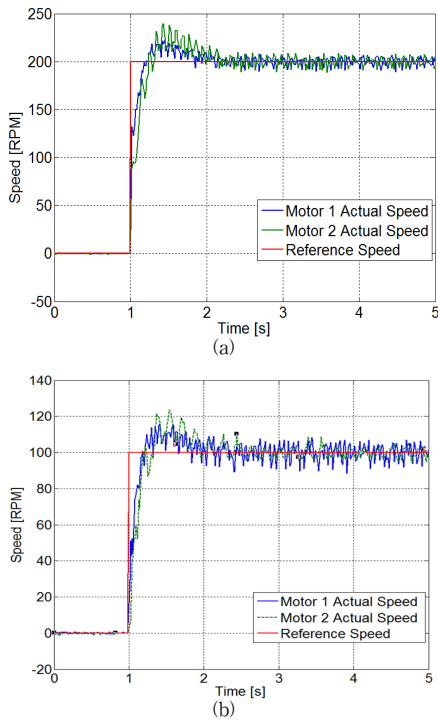


그림 8. 다중 모터 제어기 속도 제어 결과
Fig. 8. A velocity control results in multi motor controller

VI. 결론

본 논문에서는 하나의 마이크로컨트롤러를 이용하여 2개 이상의 PMSM을 제어하는 다중 모터 제어를 구현하였다. 각 모터의 벡터 제어를 구현하였으며 그것을 기반으로 하여 속도 제어기 및 전류 제어를 구현하였다. 또한 Infineon TC1797의 ADC 모듈을 이용하여 다중 PMSM을 제어하기 위한 ADC 자원 분배 방법을 설계하였다.

실험에서는 2개 모터의 제어 결과를 보였으나, 3개 이상의 경우에도 확장이 가능하다. 향후 ADC 타이밍 및 제어기 수행 타이밍 선정에 따라 모터 제어 성능의 차이와 CPU 부하 특성을 실험을 통하여 확인할 예정이다.

References

[1] X. Shaobo and L. Cheng, "Stability Control of a

Dual-motor Vehicle based on Coordinated Application of Motor and Hydraulic Actuator," in Proc. Power Electronics Systems and Applications, pp. 1-5, 2011.

- [2] S. Jacobs, D. Hectors, F. Henrotte, M. Hafner, M. H. Gracia, K. Hameyer and P. Goes, "Magnetic material optimization for hybrid vehicle PMSM drives," World Electric Vehicle Journal, Vol. 3, May 2009.
- [3] T. M. Jahns, G. B. Kliman and T. W. Neuman, "Interior PM synchronous motors for adjustable speed drives," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-22, no. 4, pp. 738-747, Jul./Aug. 1986.
- [4] P. Raksincharoensak, M. Nagai and M. Shino, "Lane keeping control strategy with direct yaw moment control input by considering dynamics of electric vehicle," Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 44, Supplement, pp. 192-201, 2006.
- [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] J.-H. Park and C.-W. Moon, "Design and Implementation of a FlexRay-CAN gateway for Real-Time Control," in Journal of Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 14, no. 2, pp.53-58, 2014
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] Y. S. Byun and Y. C. Kim, "A vector control method for multiple induction motors," in Proc. of Conference on Information and Control Systems, vol. 2, pp. 649-652, Nov, 2003.
- [11] S. H. Kim, "DC, AC, BLDC Motor Control", Bogdo, 1993.
- [12] TC1797 Users Manual, Infineon Technologies AG, 2009
- [13] "3-phase complementary Pwm with hardware triggered ADC conversion", Application Note AP32135, Infineon Technologies AG, 2009.

이 경 중(정회원)



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

저자 소개

권 재 민(준회원)



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

안 현 식(정회원)



- 1992년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학박사)
- 1993년 ~ 현재 : 국민대학교 전자공학부 교수
- <관심분야 : 차량 전자 제어, 차량 소프트웨어, 지능 시스템>

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT융합 고급인력과정 지원사업(NIPA-2014-H0401-14-1001), 산업통상자원부 SW융합부품형기술개발 사업(No.10047774, 국제안전기준 부합화를 위한 사시안전 통합 제어모듈 개발)의 연구결과로 수행되었음