

하이브리드 전기자동차 발전기 제어용 MPC555 보드 개발

곽우신, 손요찬, 설승기
서울대학교 전기공학부

Development of MPC555-based Controller for Generator Control of HEV

Mu-Shin Kwak, Yo-Chan Son, Seung-Ki Sul
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 Motorola사의 MPC555 마이크로프로세서를 탑재하여 개발한 제어보드가 소개된다. 이 보드를 사용하여 하이브리드 전기자동차의 발전기를 제어하는 실험을 수행하였다. MPC555는 전력시스템 제어에 필요한 다양한 입출력 장치를 내장하고 있어서 통합제어를 위한 one-chip solution을 가능하게 해 준다. MPC555는 내부 플래시 메모리가 비교적 대용량(448kbytes)이고 부동 소수점 연산이 가능하다. 또한 A/D 채널이 32개이고 SPI(Serial Peripheral Interface) 모듈 1개, SCI(Serial Communication Interface) 모듈 2개, CAN(Control Area Network) 모듈 2개 등의 다양한 통신채널을 내장하고 있다. MPC555는 TPU(Time Processing Unit) 채널 32개로 다양한 timing function을 구현할 수 있게 해 준다. 개발된 제어 보드를 이용하여 하이브리드 전기자동차의 유도발전기 시스템에 대한 축소 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 서 론

직렬형 하이브리드 전기자동차는 엔진으로 발전기를 구동하여 전력을 만든 후 이 전력을 이용하여 전동기를 구동해서 자동차의 동력을 만들어낸다. 구동에 사용될 전력을 만들기 위한 발전기의 제어가 필요하며, 뿐만 아니라 초기 기동시에 전력 공급에 필요한 엔진을 구동시키기 위하여 별도의 기동 회로가 요구되기도 한다. 발전기 시스템의 구조를 3상 승압형 PWM(Pulse Width Modulation) 컨버터로 사용할 경우 엔진 시동용 인버터와 발전용 컨버터를 통합할 수 있으며 그 구조가 전동기 구동용 인버터와 동일한 구조이기 때문에 부품의 통합화 및 유지 관리, 성능면에서 유리한 점이 있다. (인버터와 컨버터 구조가 동일하므로) 제어 보드 또한 동일한 구조의 알고리즘을 수행하게 되므로 통합화, 표준화된 제어 시스템의 개발이 필요하다.

전기자동차에 사용될 제어용 보드는 저가, 고 신뢰도에 초점이 맞춰지므로 one-chip solution을 지향하게 된다. 그러기 위해서는 다양한 입출력 장치를 내장한 마이크로 프로세서를 신중히 선정하지 않으면 안 된다. 이러한 요구에 따라 본 연구에서는 여러 종류의 마이크로 프로세서를 비교, 분석한 결과 Motorola사의 MPC555가 최적이라 판단하고 선정된 CPU로 제어보드를 개발했다. MPC555의 TPU3 모듈은 코어와는 별도의 마이크로 엔진으로서 다양한 timing function을 만들 수 있어서 전동기를 구동하는 데 있어 필수인 PWM 게이팅 신호 발생을 수월하게 할 수 있게 해 준다. A/D 입력 채널도 32채널 내장되어 있어 전류제어에 필요한 A/D 변환기를 별도로 취부할 필요가 없다. 그 밖에 전기자동차 제어의 시스템 특성상 필요로 하는 다수의 디지털 입출력 핀을 확보할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점을 바탕으로 선정된 MPC555 마이크로 프로세서로 제어보드를 제작하여 실제로 발전기 제어에 적용해 봄으로써 개발된 제어보드의 성능을 실험으로 입증하였다.

2. 본 론

2.1 MPC555 보드 개발

발전기 및 추진용 전동기를 제어하기 위해서 제어가 갖추어야 할 기능으로는 크게 A/D 변환, PWM 게이팅 신호 발생, 엔코더 신호 입력 등이 있다. 여기에 자동차에 사용될 제어기임을 감안한다면 다수의 입출력 채널도 확보되어야 한다. 또한 개발 과정에서의 디버깅 목적으로 D/A 변환도 가능해야 한다. 본 연구에서는 개발된 제어시스템의 구성 및 사양과 활용에 대해 소개한다.

개발된 제어 보드는 기본적으로 전동기 2대를 동시 구동할 수 있도록 설계되었다. A/D 입력 8채널, 게이팅 신호 발생부 2 세트, 엔코더 신호 입력부 2세트가 설계되어 있다. 그리고 게이팅 용도로 EPLD 한 개, RS-232통신 채널 2개, SPI 채널 한 개, CAN 통신 채널 한 개 및 디버깅 용도의 LED 3개, 7-segment 한 개가 설계되어 있다. 그리고 디지털 입출력 채널이 각각 4개씩 제공된다. 그림 1은 이러한 사양으로 개발된 제어보드의 실제 사진이다.

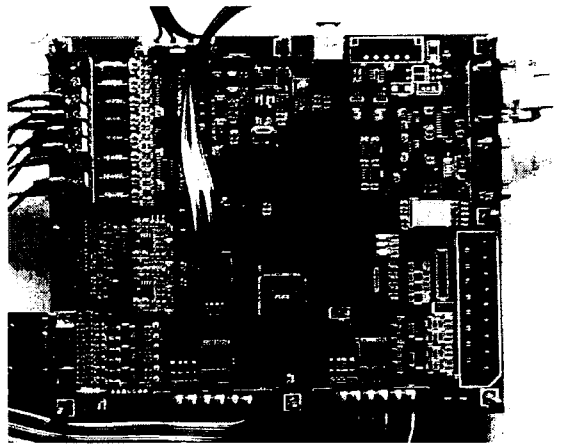


그림 1 전기자동차 발전기 제어용으로 개발된 MPC555 보드

MPC555는 32bit의 부동소수점 형식의 CPU로서 동작 주파수는 40MHz이다. 코어 CPU는 PowerPC 계열이고 램 26kbytes, 플래시 메모리 448kbytes가 내장되어 있다. 입출력은 5V 기반이고 내부 회로는 3.3V를 필요로 한다. 기준 동작온도는 $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 로서 자동차용 응용분야의 환경을 만족한다.

MPC555는 32채널의 A/D채널을 제공한다. 독립된 2개의 A/D 모듈에 각각 16채널씩 할당되어 있어서 동시에 2 채널 샘플링이 가능하다. 10bit로 변환되어 저장되며 변환 시간은 $10\ \mu\text{sec}$ 이다. 각 모듈 당 64개의 큐가 있어서 샘플 시퀀스를 소프트웨어에서 쉽게 코딩해

넣을 수가 있다. 결과 레지스터는 signed와 unsigned를 모두 제공한다. 그리고 샘플링 트리거는 소프트웨어적으로 하는 방법과 외부 트리거 신호로 하는 방법, 주기적으로 트리거 하는 방법 등이 있다. 그러나 샘플링 가능한 채널이 2개밖에 안 된다는 것이 가장 큰 단점이다.

PWM 게이팅 신호는 다양한 timing function을 만들어 낼 수 있는 TPU3모듈을 이용해서 발생시킨다. MPC555에는 두 개의 TPU3 모듈이 있는데 각각 16개의 채널이 있다. TPU3 모듈은 한마디로 MPC555 코어의 개입 없이도 스스로 micro-instruction을 수행할 수 있는 별도의 micro-engine이다. 특정 코드를 TPU3 전용 플래시 메모리에 써 넣어서 원하는 timing function을 만들어 낼 수 있다. MPC555에는 주로 많이 쓰이는 16개의 function이 Motorola사로부터 기본적으로 프로그램되어 제공된다. 그 중 MCPWM(Multi-Channel Pulse Width Modulation) function을 이용하여 center aligned PWM 신호를 발생시킬 수 있다. 인버터 한 대를 구동하기 위해서는 13개의 TPU3 채널이 필요하며 자체적으로 dead time을 발생시킬 수 있다. 그러나 MPC555 외부에 X-OR 게이트가 부가적으로 필요하다는 단점이 있다. 인버터 한 대를 구동하기 위해 6개의 외부 게이트가 필요하다. 개발된 보드에서는 EPLD를 사용하여 외부 게이트를 대체했다. 또한 제어 주기를 스위칭 주기보다 더 빠르게 할 수는 없다는 단점도 있다. 5kHz 스위칭에서 10kHz 제어 주기는 불가능하다.

엔코더 신호 입력에는 PWM 게이팅 신호 발생시와 마찬가지로 TPU3모듈을 이용한다. PWM 게이팅 신호 발생이 output compare라면 엔코더 신호 입력의 경우는 input capture에 해당한다. 미리 정의된 기능 중 FQD(Fast Quadrature Decode)를 이용하여 엔코더 신호를 입력 받는다. TPU3 채널 2개를 이용하여 4채널의 엔코더 신호를 입력받아 edge의 카운트 개수와 발생 시간 시점 정보를 받을 수 있다. 이 정보를 이용하여 M/T 방식의 속도 측정이 가능하다.

전기 자동차의 경우 제어보드는 다수의 digital I/O를 수용할 수 있어야 한다. 필요한 외부 입출력 채널을 확보하기 위해서는 MPC555의 외부 버스를 본래의 목적으로 사용하지 않고 입출력 핀으로 할당해야 한다. 그래서 data 버스 32핀과 address 버스 24핀을 입출력 핀으로 사용할 수 있게 하였다. 그 밖에 MPC555의 다양한 모듈에서 사용되는 핀들도 본래의 목적으로 사용하지 않을 때는 general I/O로 사용할 수 있게 되어 있다.

마지막으로 개발 단계의 디버깅 목적으로 D/A 출력이 필요하다. 별도의 serial D/A 컨버터 보드에 인터페이스해서 출력을 볼 수 있게 하기 위해 MPC555의 SPI 모듈을 이용하여 데이터를 전송할 수 있게 했다.

2.2 하이브리드 전기자동차용 발전기 제어 알고리즘

직렬형 하이브리드 전기자동차에서는 필요한 전력을 만들어내기 위해 배터리의 전하량과 엔진의 상태에 따라 발전 시스템이 발전해야 하는 전력량이 적절히 분배된다. 이렇게 분배된 전력을 발전하기 위해 엔진이 일정 토크로 제어되는 상황에서 발전기는 일정속도로 제어된다. 엔진은 출력 파워에 따라 엔진의 효율을 높이기 위한 속도-토크 패턴이 있는데 여기에 해당하는 속도값을 발전기 제어기의 기준값으로 입력받아 발전기를 속도제어 하는 것이다. 발전시스템의 속도-토크 패턴의 일례를 그림 2에 나타내었다.

이러한 패턴을 구현하기 위해서는 속도 제어와 토크제어가 필요하다. 본 연구에서는 엔진을 토크제어하고 발전기에 해당하는 유도 전동기를 속도제어함으로써 발전 제어를 수행했다. 발전 제어 알고리즘의 기본 개념도를 그림 3에 나타냈다. 추진용 전동기나 그 밖의 전력소비

장치로부터 필요한 전력량에 따라 발전기에 분배된 전력량을 발전기 위해 패턴에 따라 유도발전기를 속도제어한다.

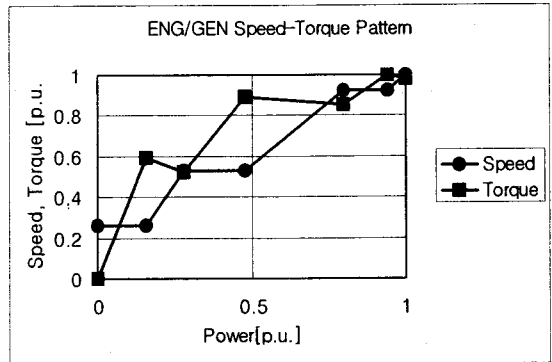


그림 2 엔진의 효율을 높이기 위한 속도-토크 패턴

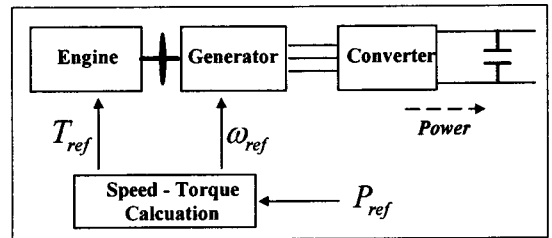


그림 3 발전기 제어 알고리즘의 기본 개념도

엔진-발전기 시스템에서 엔진을 모의하는 DC전동기는 전기자 전류를 제어하여 토크제어를 한다. 이 시스템에서 발전기를 모의하는 유도 전동기는 속도제어를 수행한다. 회전자 자속기준 직접백터제어를 수행함에 있어 자속 추정기는 참고문헌 [1]에서 제안된 새로운 알고리즘을 적용했다. 그리고 MPC555의 게이팅 발생 특성상 2샘플 지연이 있으므로 전류 prediction을 하여 게이팅 시간을 계산했다. 정격 속도 이상에서는 약제자 제어를 수행하여 제안된 전압으로 필요한 속도를 얻을 수 있게 했다. 속도측정용으로 1024 펄스의 엔코더를 취부하여 M/T 방식으로 속도정보를 얻었다.

2.3 실험결과

본 연구에서는 발전기 구동용 엔진을 DC 전동기로 대체하여 실험하였다. 두 대의 전동기를 구동할 수 있도록 설계된 MPC555보드로 유도발전기와 엔진용 DC전동기를 동시에 제어함으로써 개발된 보드의 성능을 검증한다.

실험에서 사용한 DC 전동기와 유도 전동기의 정격은 표 1과 같다.

그림 4는 개발된 MPC555보드로 앞에 기술한 전동기 2 대를 구동하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 전류제어기에는 A/D변환(20 μ sec), protection부, 유도기 자속추정기, 전류 prediction부, 유도기의 자속제어기, d축 전류제어기, q축 전류제어기, DC전동기의 전기자 전류제어기, DC 전동기의 전기자 전류에 따른 감자현상 보상을 위한 계자전류 보상 알고리즘, dead time 보상 및 영전류 클램핑 보상 알고리즘 등이 포함되어 있다. 그리고 속도 제어기에는 유도전동기의 속도 제어기, 약제자 제어 알고리즘 등이 들어가 있다. 그림 4는 이러한 알고

리즘을 개발된 MPC555 제어보드에서 200 μsec 내에 수행할 수 있는가를 보여주고 있다.

표 1 실험에 사용된 DC 전동기와 유도 발전기의 정격

| | DC 전동기 | 유도 발전기 |
|---------|-----------|-----------|
| 정격파워 | 19.9kW | 22kW |
| 정격전압 | 260V | 220V |
| 정격전류 | 90A | 74.6A |
| 정격속도 | 1850r/min | 1765r/min |
| 정격토크 | 102.72N-m | 119.03N-m |
| 계자 정격전압 | 180V | 해당없음 |
| 계자 정격전류 | 2.82A | 해당없음 |

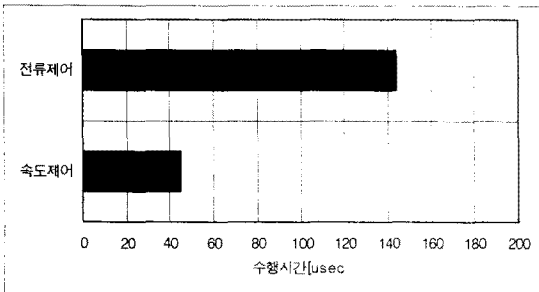


그림 4 개발된 MPC555보드의 전류 제어 및 속도제어기 수행 시간 (제어 주기 : 200usec)

그림 5는 발전량에 따른 속도-토크 패턴을 따라 DC전동기와 유도 발전기를 각각 속도제어, 토크제한 파형이다. ω_{rpm} 은 유도발전기의 속도, T_e 는 DC 전동기의 토크, λ_{dr}^e 는 유도발전기의 동기파표계 회전자 자속을 나타낸다. λ_{dr}^e 는 고속으로 넘어가면서 유도발전기가 약제자되는 파형을 보여 주고 있다. 제어기 입력단에 기준 전력을 20초동안 20kW까지 선형적으로 증가시키면서 측정된 속도와 토크의 파형을 나타낸 것이다. 따라서 시간축을 전력 축으로 볼 수 있다. 실험파형에 나타난 ω_{rpm} , T_e 패턴은 그림 2에 도시한 패턴을 적용한 것이다.

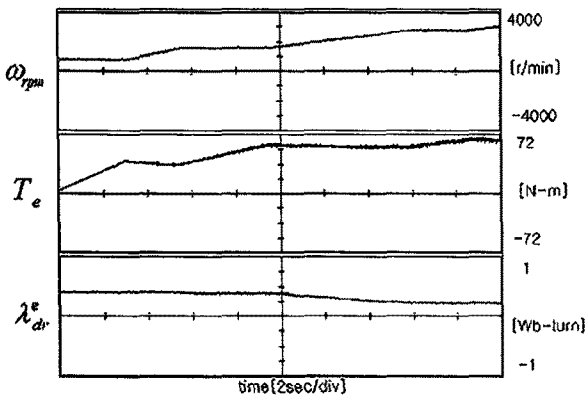


그림 5 개발된 MPC555보드에 발전 패턴을 삽입하여 발전제어 한 실험 파형(유도발전기 : 속도제어, 엔진용 DC 전동기 : 토크제어)

3. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 전기자동차의 발전기 제어용 MPC555 보드의 개발 및 성능 검증이 수행되었다. 자동차용 제어기의 특성상 one-chip solution을 찾아야 한다는 점에서 MPC555가 지니는 장점 및 선정 근거가 논의되었다. MPC555는 전동기 제어에 필요한 여러 외부장치들이 내장되어 있고 다수의 디지털 입출력 핀을 제공할 수 있다는 점에서 전기자동차 및 일반 전력 시스템 제어기의 마이크로프로세서로서 적합하다. 보드를 개발하여 테스트를 해 본 결과 MPC555의 가장 큰 단점으로서의 수행속도를 꼽을 수 있다. 현재 MPC555 코어의 동작 주파수는 40MHz이나 향후 90MHz의 새 버전 출시가 예상되고 있어 이 문제는 상당부분 해결될 것으로 보인다. 개발된 제어보드로 하이브리드 전기자동차의 발전기 제어를 수행하여 보드의 성능을 실험으로 검증하였다. 엔진의 효율을 높이기 위해 엔진은 특정 속도-토크 패턴을 따라 운전해야 하는데 본 실험에서는 DC전동기를 엔진용으로 모의하여 토크제어를 하고 유도전동기를 발전기용으로 하여 속도제어를 하는 실험을 수행하였다. 발전기 제어 알고리즘을 개발된 보드를 이용하여 실험함으로써 개발한 보드의 성능을 입증하였다.

본 연구는 환경부의 저공해 기술개발 사업의 일환으로 현대자동차로부터 저공해 하이브리드 전기버스 개발 과제를 위탁받아 수행되었음

(참 고 문 헌)

- [1] Jang-Hwan Kim, Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "Novel Rotor Flux Observer Using Observer Characteristic Function in Complex Vector Space for Field Oriented Induction Motor Drives," IEEE APEC, Vol.1, pp.615-621, 2001.
- [2] Hyeoun-Dong Lee and Seung-Ki Sul, "Diesel Engine Ripple Torque Minimization for Parallel Type Hybrid Electric Vehicle," IEEE IAS, Vol.2, pp.942-946, 1997.
- [3] Hyeoun-Dong Lee and Seung-Ki Sul, "Advanced Gear Shifting and Clutching Strategy for Parallel Hybrid Vehicle with Automated Manual Transmission," IEEE IAS, Vol.3, pp.1709-1713, 1998.
- [4] 손요찬, 장석주, 설승기, "전력전자 시스템용 TMS320C6701 하드웨어의 개발," KIEE 학계학술대회, 권호 F, pp.2635-2637, 1999.
- [5] Seung-Ho Song, Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul "Transient Torque Maximizing Strategy of Induction Machine in Field Weakening Region," IEEE PESC, Vol.2, pp.1569-1574, 1998.