

# MPC5554를 이용한 HEV용 IPMSM 벡터제어

## IPMSM Vector Control using MPC5554 for HEV

문정송\*                      이정효\*                      하인용\*                      원충연†  
Jung-Song Moon              Jung-Hyo Lee              In-Yong Ha              Chung-Yuen Won

---

### ABSTRACT

MCU(Micro Controller Unit) used for the automobiles has been required for improving of the safety and high reliability. Also, the necessity of high performance MCU equipped with high fuel-efficiency has been risen according to increased requests of high fuel-efficiency and improving the occupants safety with the development of intelligent vehicles and future vehicles.

The MPC5554 32-bit embedded controller, made by Freescale Semiconductor, specialized in the part of the power train provides the high reliability, fast interrupt process and real-time control. In This paper, the investigation on IPMSM using MPC5554 has been performed. Also SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) is implemented to the servo system.

---

### 1. 서 론

자동차 배기가스로 인한 지구온난화와 화석연료 고갈이라는 사회적 문제가 사회적 화두로 떠오름에 따라 기존의 내연기관 차량의 대안으로 HEV, EV, PHEV, FCEV등 친환경 차량에 대한 사회적 요구가 증대되고 있는 실정이다. 전력전자 분야의 반도체 스위칭소자, 자성체재료 그리고 MCU의 발전은 이러한 사회적 요구에 충분히 부합할 수 있는 원동력이 되고 있다. 특히 높은 효율과 출력밀도를 갖는 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 미래형 차량용 전동기로 상용화 되었으며 현재도 많은 연구가 진행 중이다.

HEV용 IPMSM은 고성능의 MCU에 기반하고 있다. 고효율, 고성능의 MCU의 기능 외에도 운전자의 안전을 극대화할 수 있는 차량 자체 진단 및 사고 예방 등의 기능을 구현하기 위해 적극 도입되고 있다. 그러나 이러한 차량에 적용되는 MCU는 차량의 요구 특성을 만족해야 한다. 차량용 마이크로프로세서에 요구되는 내열성은 125도 정도이며 또한 고급 안전 기능을 구현하기 위해서는 복잡한 명령어로 구성된 프로그램이 필요하다. 따라서 고성능 ECU(Electronic Control Unit)에 채택되는 32bit MCU의 경우는 차량의 특성에 적합한 온도 특성 및 프로세싱 능력과 임베디드 메모리가 필수적이다.

Freescale사의 차량용 32bit MCU인 MPC5554는 위의 조건들을 만족하는 파워트레인 부문에 특화된 MCU이다. MPC5554는 업계 표준의 높은 신뢰성을 만족하며, 빠른 인터럽트 속도를 제공한다. 또한 MCU 코어가 두 개(FPU/TPU3)가 내장된 듀얼 MCU로서 프로그램의 병렬수행을 통해 고속의 처리 능력을 갖추고 있다.

본 논문에서는 HEV용 IPMSM에 MPC5554를 통한 벡터제어 실험을 수행함으로써 그 성능을 검증하고자 한다.

---

† 책임저자 : 성균관대학교, 정보통신 공학부 교수, 원충연  
E-mail : star20416@hanmail.com  
TEL : (031)290-7169 FAX : (031)299-4623  
\* 성균관대학교

## 2. MPC5554의 특징

MPC5554는 파워트레인 부문에 특화된 PowerPC 계열의 코어를 가지는 32-bit MCU이다. 2M 플래시 메모리 64K RAM등이 온칩되어 있어 많은 양의 데이터와 명령어를 저장할 수 있다. 복잡한 I/O 타이머 기능은 32채널을 제어할 수 있는 두개의 eTPU(enhanced Timer Process Unit)를 통해서 수행된다. 또한 간단한 타이머 기능은 eMIOS(enhanced modular input/output system)를 통해서 수행된다. 오프칩 통신은 세 개의 FlexCAN(Controller Area Networks), 네 개의 DSPI(Deserial/Serial Peripheral Interface), 두 개의 eSCI(enhanced Serial Communications Interface)로 구성된다.

표 1. MPC5554 주요 구성

구성		특징
Power Architecture e200z6 core		132MHz
SRAM		64k
RWW Flash		2Mbyte
Unified-cache		32k
I/O	CAN	3
	eSCI	2
	DSPI	4 x 16bits
Temperature range		-40 ~ 125°C

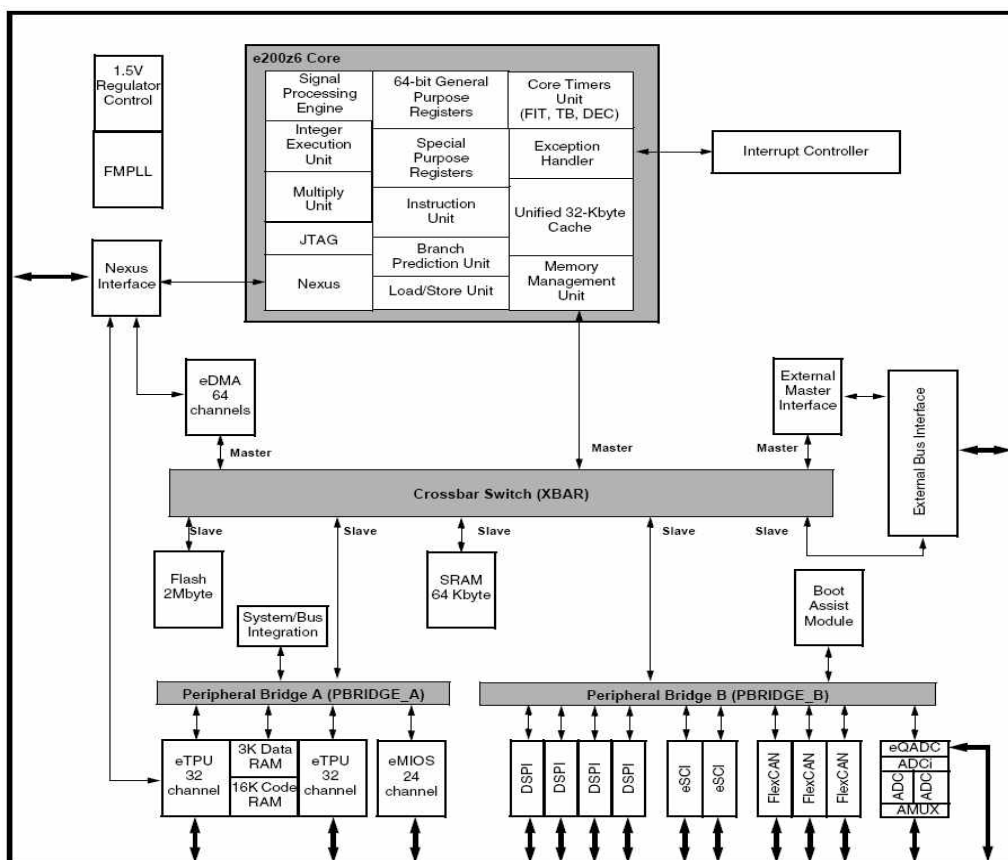


그림 1. MPC5554 블록 다이어그램

### 3. IPMSM의 토크제어

IPMSM은 영구자석이 회전자의 내부에 위치하고 있는 전동기이다. 회전자의 영구자석은 d축 방향에서 공극과 같은 역할을 하게 된다. 그래서 자석을 통과하는 d축 인덕턴스보다 자석을 통과하지 않는 q축 인덕턴스가 크게 되고 이러한 특성은 돌극을 만들어 낸다. IPMSM의 회전자의 영구자석에서 발생하는 자속에 의해 발생하는 토크 이외에 돌극성에 의한 자기저항의 차이로 인해 발생하는 토크 성분을 얻을 수 있다.

IPMSM의 d-q전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_s = \begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_{pm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $L_d, L_q$  는 d축과 q축의 인덕턴스 성분을 나타내고  $p$  는 미분계수 이다.

또한, 토크식은 아래와 같다. 첫째 항은 회전자의 영구자석에 의해 발생하는 토크이고, 둘째 항은 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 차이 즉, 돌극에 의해 발생된 토크이다.

$$T_e = \frac{3P}{2} \left\{ \lambda_s i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r \right\} \quad (2)$$

여기서  $P$  는 전동기의 극수이다.

한편 IPMSM의 역기전력 전압은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$V_{om} = \dot{\omega}_r \sqrt{(L_d i_d + \phi_f)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (3)$$

역기전력 전압 수식과 토크 방정식을 이용하면 다음과 같은 토크제어를 위한 전류 지령을 만들 수 있다.

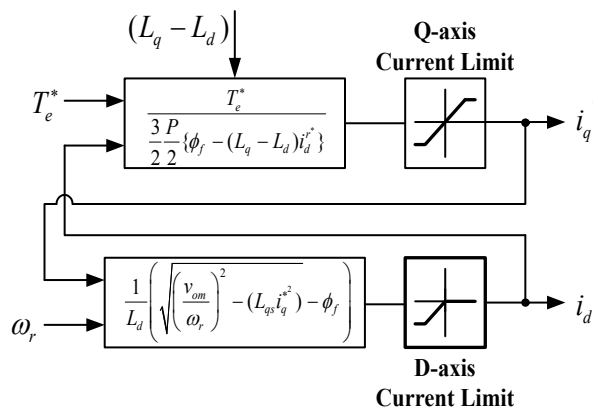


그림 2. 토크제어부

MPC5554를 이용하여 다음과 같은 IPMSM 토크제어를 수행하였다. 입력된 토크지령은 그림 3의 토크제어부를 통해 전류지령을 만들게 되며 전류지령은 좌표변환에 의해 2상 고정좌표계 전압 지령을 만들게 된다. 이를 SVPWM을 통해 변조하여 인버터를 제어하게 된다. 한편 전동기의 속도 및 위치 측정은 RDC를 이용하여 수행하였으며 다음 장에서 이를 설명한다.

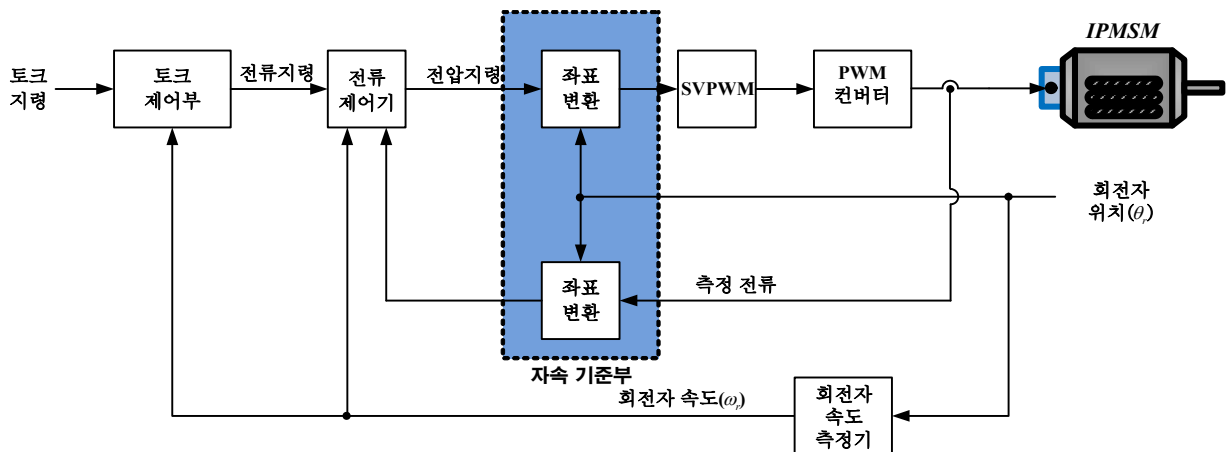


그림 3. IPMSM 벡터제어 시스템 블록도

#### 4. R/D 컨버터(Resolver to Digital converter)

일반적으로 레졸버는 진동, 충격 등에 강한 내구성을 지니며 우수한 온도특성을 지니기 때문에 산업분야에 널리 사용된다. 특히 강한 내구성을 갖는 특성은 부하변동이 큰 차량용 센서로 적합하다. 본 논문에서는 회전자의 위치와 속도 추정을 위하여 레졸버/디지털 컨버터를 실험에 사용하였다.

레졸버의 기본적인 원리는 회전 변압기의 원리를 지닌다. 1차 측 고정자에 지령전압이 인가되면 회전자에 회전함에 따라 2차 측 고정자에 유기전압을 전달하게 된다. 2차 측에 발생된 유기전압은 두 개의 고정자를 통해 sine와 cosine성분으로 나뉘게 되는데, 두 성분의 크기는 회전자의 위치( $\theta$ )정보를 담고 있다. sine성분과 cosine성분을 이용한 위치를 나타내는 수식은 다음 식과 같다.

$$\tan^{-1} \frac{V_{S-s}}{V_{S-c}} = \theta \quad (4)$$

여기서  $V_{S-s}$ 는 2차 측 sine항 고정자의 인가전압,  $V_{S-c}$ 는 2차 측 cosine항의 고정자의 인가전압을 의미한다. 위와 같이 얻어진 아날로그신호의 위치정보는 디지털 컨버터를 통해 위치 정보와 속도 정보를 2진 데이터로 변환하여 출력하게 된다.

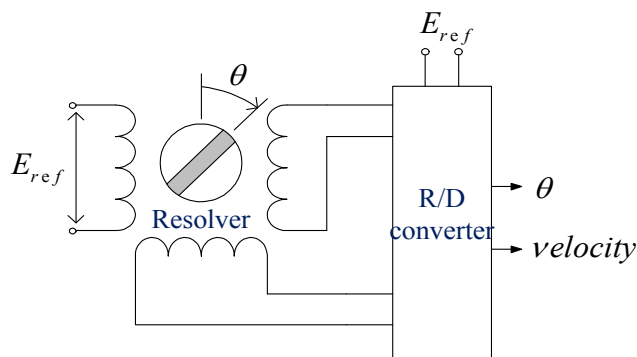


그림 4. R/D 컨버터의 기본 구성

## 5. 실험 결과

Freescale사의 MPC5554의 수행 능력을 평가하기 위해 HEV용 IPMSM을 사용하였다. 인버터에 DC전원을 공급하고 전동기 부하장치를 제어하기 위해 MG세트 제어가 이용되었다. 또한 냉각수 시스템을 이용하여 실제 차량환경에 유사하게 60° 로 인버터 및 전동기에 온도를 설정하였다. 표 2는 실험에 사용된 IPMSM의 파라메타를 나타내고 그림 5는 실험을 수행하기 위해 구성된 세트의 블록도를 나타낸다.



그림 5. 실험세트 블록도

표 2. IPMSM 파라메타

극 수	8 극
$R_s$	0.0065[Ω]
$L_d$	0.00076[H]
$L_q$	0.00115[H]
$\phi_f$	0.211[Wb]
정격토크	270[N·m]
정격속도	1000[rpm]
정격출력	30[kW]

그림 6은 손으로 구동하였을 때 발생하는 U상의 역기전력과 레졸버를 통해 출력되는 D/A파형을 나타낸 그래프이다. 그림 7은 SVPWM을 적용한 결과로서 3고조파 성분이 포함된 파형이 나타남을 알 수 있다.

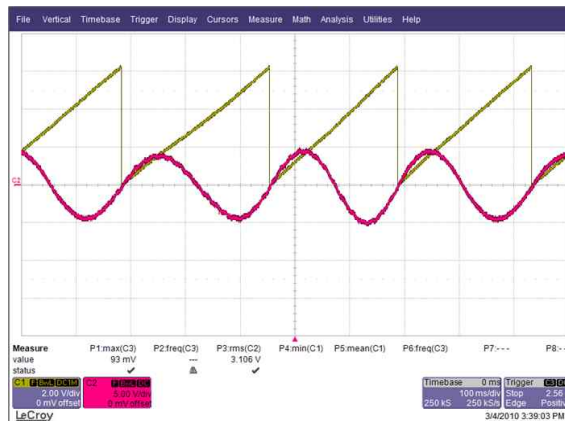


그림 6. 전동기 상 역기전력과 레졸버  $\theta$  측정(손으로 구동)

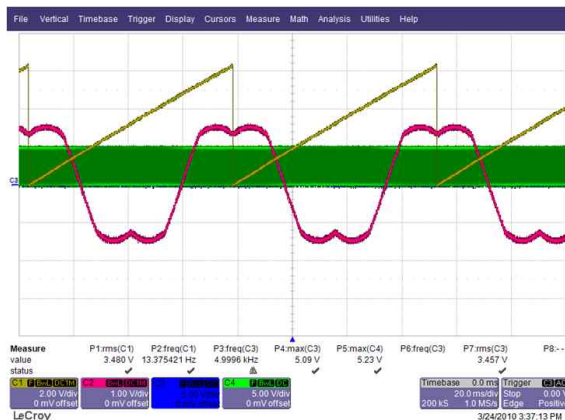


그림 7. SVPWM 적용

그림 8과 9는 전동기 토크제어를 수행한 파형이다. MG세트 제어기가 전동기 부하장치를 500[rpm]으로 구동하면 IPMSM은 500[rpm]으로 회전 중 제어 보드에 의한 토크 출력을 발생하게 된다. 그림 8은 0[N·m] 인가 시 지령전압과 PWM파형 그리고 레졸버의 위치 출력파형을 나타내고 그림 9는 200[N·m] 인가시 출력파형을 나타낸다.

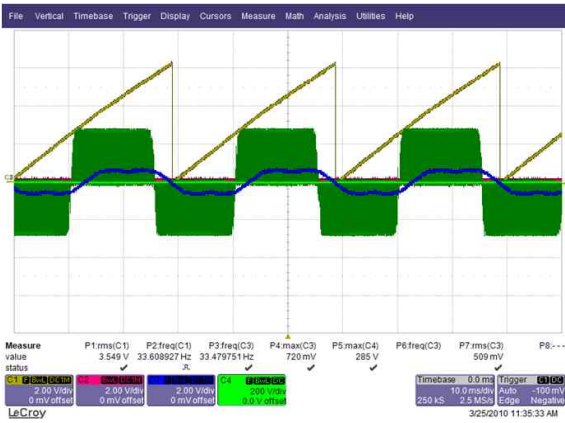


그림 8. 500[rpm] 구동 시 토크제어 (0[N·m] 인가)

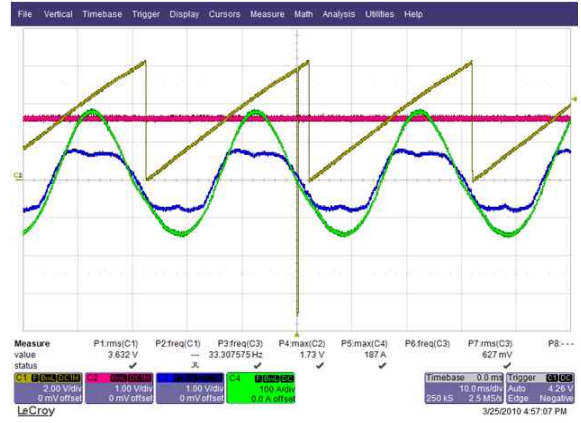


그림 9. 500[rpm] 구동 시 토크제어 (200[N·m] 인가)

그림 10은 0[N·m]에서 200[N·m]으로 토크가변 시 출력파형을 나타낸다. 0[N·m]에서 200[N·m]으로 토크가변 시 토크응답은 40[ms]로 제어됨을 알 수 있다.

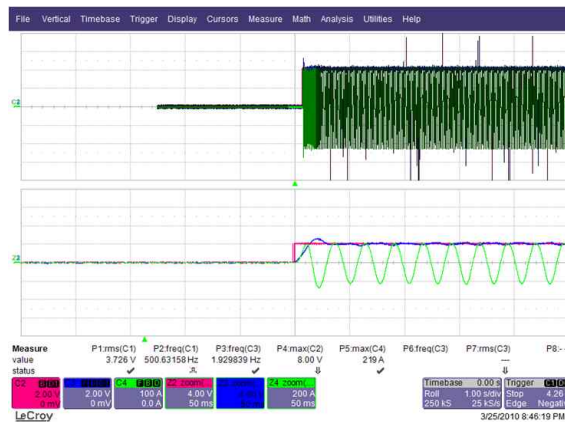


그림 10. 500[rpm] 구동 시 토크제어 (0[N·m] → 200[N·m])

## 6. 결론

본 논문에서는 MPC5554를 이용한 HEV용 IPMSM의 인버터를 제작하여 고성능 MCU의 성능을 검증하였다. 다양한 변수 조건에서 토크제어를 수행함으로써 MPC5554의 안정성을 검증하였고 SVPWM방식을 적용하여 토크제어를 수행하였다. 기존의 상업용으로 널리 사용되는 DSP와 비교하여 내열성이 우수하고 파워트레인 분야에 최적화된 MPC5554를 이용하여 IPMSM제어가 원활하게 수행되는 것을 확인하였다.

## 7. 감사의 글

본 연구는 호남 광역 경제권 선도 산업 지원단 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Freescale, "MPC5553/5554 Microcontroller Reference Manual", 2007.
2. M. A. Raman, "Advances on IPM technology for Hybrid electric vehicle", Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC), pp.92-97, 2009.
3. Masayuki Hattori, "Needs and Applications of High Temperature LSIs for Automotive Electronic Systems", High Temperature Electronic(HITEN 99) The Third European Conference on, pp.37-43, 1999.
4. 김상훈, "DC 및 AC모터 제어" 북두출판사, 2007.