

제21회 Intelligent Electronics 경진대회 작 품 설 명 서

참가번호 : 자유 21-15
작품종목 : 자유종목

참가팀명	GaN다	학 교 명	건국대학교	학부(과)	전기전자공학부
		지도교수	조영훈	팀 구 분	학부팀
팀 원	심민형, 변민기, 유정현, 이재륜, 정찬혁				
작 품 명	GaN 인버터를 이용한 PMSM의 소음 및 진동 개선				

▶ 작품 개요

Si 인버터는 낮은 가격과 제어의 용이성으로 PMSM 구동용 PWM 인버터에 가장 흔히 사용되고 있다. 그러나 Si 전력용 반도체의 한계로 인하여 스위칭 주파수를 높게 사용할 수 없고, 이는 전류 리플과 토크 리플을 발생시켜 사용자에게 소음 및 진동 등의 불편함을 야기한다. 한편 최근 활발히 연구되는 GaN 전력용 반도체는 빠른 스위칭 속도를 가져 Si에 비해 비약적으로 높은 스위칭 주파수 사용이 가능하다. 이를 통해 전력변환시스템의 품질 향상 및 높은 전력 밀도 달성이 가능하고, 전동기 구동용으로 사용 시 토크 리플 저감에 효과적이다. 그러나 GaN 전력용 반도체의 낮은 문턱 전압과 높은 dv/dt는 제어에 어려움으로 작용하여 안정적인 구동을 위해서는 높은 기술력이 필요하다. 따라서 본 대회에서는 GaN의 특성을 고려한 PCB 설계를 통해 안정적인 PMSM 구동을 가능하게 하고, 높은 스위칭 주파수를 이용해 PMSM의 토크 리플을 저감시켜 소음 및 진동 저감을 달성한다.

▶ 작품 설명

1. 개발 방향

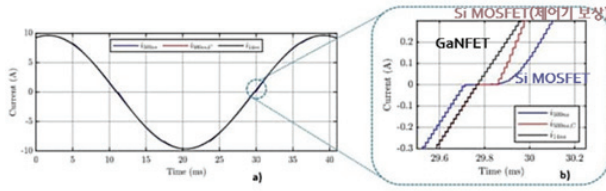
일반적인 Si MOSFET의 경우 500ns 정도의 데드 타임을 갖는 반면에 GaNFET의 경우 14ns의 데드 타임을 갖는다. 이는 약 37배라는 현저한 성능 차이이다. 이는 $[\alpha]$ 실험에서도 확인할 수 있었다. Si MOSFET만을 사용한 경우에 파형 왜곡이 가장 심하게 나타났고, 그 다음은 Si MOSFET을 사용하며 제어를 통해 보상한 경우였다. GaNFET을 사용한 경우 가장 Sin파형과 비슷한 형태를 보여주었다. 이를 통해, GaN FET으로의 교체를 통해 전보다 더욱 명확한 형태의 전류 신호를 만들 수 있다는 것을 확인하였다.

작품의 구현을 위해 개발 방향을 모터 제어를 위한 Sensorless 제어와 GaNFET 스위칭 소자를 사용한 PCB-board로 나누어 진행했다.

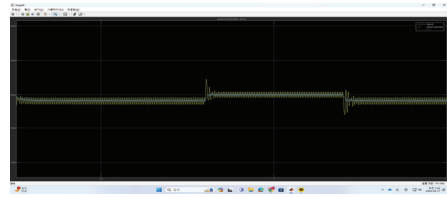
2. 모터 Sensorless 제어기

모터의 구동 방식으로는 센서리스 제어를 사용한다. 따라서 Sensorless Control Strategy for Salient-Pole IPMSM Based on Extended EMF in Rotating Reference Frame 논문을 통해 센서리스 제어를 학습했다. 논문을 기반으로 센서리스 제어를 Simulink로 시뮬레이션 수행했다. Extended EMF를 기반으로 회전자의 속도와 위치를 추정하는 Observer를 구현하여 모터를 제어하는 Logic을 구현하고 파형을 검증했다. 제어 Logic과 이로 인한 결과를 통해 안정적으로 위치 추종을 하는 것을 확인했다.

실제 회로 실험을 하기 위해 Simulink 블록을 Digital 제어기로 변환하는 작업을 진행했다. 전류 및 속도 제어와 이를 위한 축 변환, 인버터 스위칭에 필요한 PWM 생성을 위해 C코드로 구현했다. 이를 기반으로 인버터의 GaNFET 스위칭 소자의 Gate Driver에 MCU가 전원 및 PWM 신호를 주입할 수 있다.



[데드타임 효과]



[시뮬레이션 결과 속도 파형]

3. PCB 보드제작

GaNFET 스위칭 소자를 사용한 PCB-board 제작을 위한 필요한 회로들은 Gate Driver-GaNFET 통합 IC 칩, Gate Driver Bootstrap Capacitor과 Bypass Capacitor, PWM buffer, PWM RC filter, DC-link Capacitor, Snubber circuit 그리고 과전류 방지회로를 고려하였으며 이들의 구성을 위해 아래와 같이 필요한 부품들을 선정하였다.

GaNFET, 게이트 드라이버 통합 IC 칩인 TI 사의 LMG2100R044로 선정하여 GaNFET으로 인한 고속 스위칭 회로설계의 편의성 높였다. 전원 DC 성분의 안정성을 확보하기 위해 바이패스 커패시터를 설계했다. 바이패스 커패시터의 경우 100nF 3개와 1uF 3개를 병렬로 연결하여 다양한 주파수 영역의 노이즈에 대해 전원의 안정성을 확보할 수 있도록 했다. 부트스트랩 커패시터는 HB와 HS 사이에 연결하여 신호의 안정성을 확보한다. 이때, I_{hb}는 상단 게이트 드라이버의 전류로 발생하는 기생성분의 영향을 줄이기 위해 최대한 HB, HS핀과 가깝게 설계한다. MCU에서 공급하는 PWM 신호의 노이즈 방지 및 안정적 처리를 위해 PWM buffer를 사용한다. 이는 동시에 스위칭 전원과 절연을 수행한다. PWM신호의 안정성을 확보하기 위해 RC필터 또한 추가했다. R=20Ω, C=47pF를 이용하여 $f_c=1/(2 * \pi * R * C) = 16.9313$ MHz의 차단 주파수를 가진 Low pass filter를 설계했다. DC link커패시터를 설계 시 회로의 기생 성분을 고려하여 설계한다. DC link커패시턴스는 $C_{vcc}=(2 * Q_G+Q_{RR}/\Delta V)$ 의 공식에서 여유 값을 가지도록 하여 0.1uF, 16V의 0402 세라믹 커패시터를 이용한다. 게이트 드라이버와 High-side, Low-side스위칭이 integrated된 하프 브릿지 형태 IC를 사용하게 될 경우, 각각의 스위치에 스너버 회로를 삽입하는 것은 불가능하다. 따라서, Schematic 설계 시 Vin과 PGND 사이에 캐패시터를 추가하여 회로를 구성한다. 과전류로 인한 회로의 소손을 방지하기 위해 과전류 방지회로를 구성했다. 신호가 비교기를 거치고 과전류가 발생하면 해당 신호가 슈미트 트리거 인버터를 거쳐서 PWM의 전원을 차단, 과전류를 방지할 수 있다. 각 소자의 호환성을 고려하여 INA317IDGKR, SN74LVC1G14로 선정했다.

Schematic에서 설계한 부품 및 회로들을 아트웍하기 위해 우선적으로 Power부와 Signal부를 분리했다. Power부로는 DC-link capacitance, half-bridge power stage, Phase A,B,C gate driver, Vin connector, Motor Connector를 배치하였고 Signal 부로는 MCU 및 MCU connector 주변회로, PWM buffer, current sensing, reference voltage, 과전류 보호기를 기능별로 블록화하여 배치했다. 전원 영역은 power layer와 GND layer로 분리하여 설계했다. Gate Driver Bypass Capacitor의 경우 동작 소자의 입력 전원 측과 가장 가까운 곳에 배치했다. Bootstrap Capacitor는 Gate Driver IC칩의 HS, HB 사이에 연결되며 최대한 HB, HS 핀과 가깝게 설계했다. 커넥터는 Vin connector, Motor connector, MCU connector를 사용했다. Vin connector의 경우 DC-link Capacitance와 과전류 방지를 위한 overcurrent protection 블록의 주변에 배치하도록 하였고, Motor connector의 경우 Phase A,B,C gate driver-GaNFET 통합 IC 칩 회로 주변에 배치하도록 했다. 마지막으로 MCU Connector의 경우 많은 Signal System들에 연결되는 만큼 Signal 부의 중앙부에 위치할 수 있도록 고려하여 route를 최소화했다. 설계한 PCB Board는 검토 후 제작하여 이후 모터 드라이브 Test Board로 사용하여 작품을 구현한다.

Shigeo Morimoto, Keisuke Kawamoto, Masayuki Sanada, Yoji Takeda, Sensorless Control Strategy for Salient-Pole PMSM Based on Extended EMF in Rotating Reference Frame, IEEE, 2002

Salvatore Musumeci, Fabio Mandrile, Vincenzo Barba and Marco Palma, Low-Voltage GaN FETs in Motor Control Application: Issues and Advantages: A Review, energies, 2021