

GaN HEMT와 SiC MOSFET 기반 인버터의 정현파 필터 유무에 따른 전동기 누설 전류 비교

박성미, 김진수, 왕산산, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구실

Comparison of Leakage Current in Electric Motors Based on the Presence of Sinusoidal Filters in GaN HEMT and SiC MOSFET-Based Inverters

Seongmi Park, Jinsu Kim, Shanshan Wang, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

WBG (Wide Band Gap) 전력반도체는 스위칭 손실이 적어, 고속 스위칭이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 시스템 고효율을 달성할 수 있으며 전력밀도를 높일 수 있다. 하지만, WBG 기반의 인버터를 사용해 전동기를 구동할 경우, 빠른 스위칭 속도로 인한 인버터 출력 전압의 높은 dv/dt가 전동기의 누설전류를 증가시키는 문제가 있다. 본 논문에서는 누설 전류가 증가하는 문제점을 해결하고자 인버터 출력 전압의 높은 dv/dt를 제거하는 전동기 진화형 정현파 필터를 설계 및 적용하였다. 또한 실험을 통해 GaN HEMT와 SiC MOSFET 기반 인버터의 정현파 필터 유무에 따른 전동기 누설 전류를 비교하였다.

1. 서론

최근 전력전자분야의 연구 중 WBG 전력반도체를 전력변환 장치에 적용하여 고효율 및 소형화를 달성하는 것은 고전력밀도 달성을 위한 중요한 부분이다. 하지만 WBG 소자의 빠른 스위칭 특성으로 인해 인버터 출력 전압에 높은 dv/dt가 발생하게 된다. 이는 전동기 구동 시스템에서 과전압, 절연 파괴 등의 문제를 유발하기 때문에 dv/dt를 저감할 수 있는 인버터 출력 필터에 대한 연구들이 이루어졌다.^[1]

전동기 구동 시스템에서 높은 dv/dt로 발생하는 공통 모드 전압은 PWM 인버터의 빠른 스위칭으로 인한 높은 주파수 성분을 포함한다. 높은 주파수 성분을 갖는 공통 모드 전압은 전동기 접지 선을 통한 누설 전류와 전동기 베어링 전류로 인한 베어링 전식 문제를 유발한다. 누설 전류는 전동기의 외함과 고정자 권선 사이의 기생 커패시턴스 성분을 통해 발생하며 전동기의 철손을 증가시키고 베어링의 수명에 악영향을 준다. dv/dt를 저감할 수 있는 방법에는 게이트 저항을 키우는 방법이 있지만 빠른 스위칭 속도가 장점인 WBG 기반 전력 변환 장치에 적합하지 않다.

본 논문에서는 GaN HEMT, SiC MOSFET 기반의 3상 인버터에 정현파 필터를 적용하여 필터 유무와 반도체 소자에 따른 누설 전류를 비교하고자 한다.

이를 위해 WBG 소자의 고속 스위칭 장점을 활용해 정현파 필터를 소형화하여 설계하였으며 실험을 통해 설계한 정현파 필터의 누설 전류 저감 효과를 검증하였다.

2. 정현파 필터 설계

2.1 정현파 필터의 누설 전류 저감

그림 1은 정현파 필터를 포함하는 3상 전동기 구동 시스템이다. 여기서 GaN HEMT 및 SiC MOSFET의 전력 반도체가 스위치 역할을 한다. 인버터의 출력단에 정현파 필터를 적용하기 전의 부하측 선간 전압 V_{INV-UV} 는 고조파 성분과 기본파가 함께 존재한다. 하지만 정현파 필터를 적용한 후 부하측 선간 전압 V_{ML-UV} 는 정현파 필터로 인해 PWM 인버터의 스위칭으로 인한 고조파 성분이 제거되어 전동기 구동 기본파 성분만 인가된다. 이에 따라 전동기의 기생 커패시터의 임피던스가 증가하여 전동기에 흐르는 누설 전류가 감소한다.

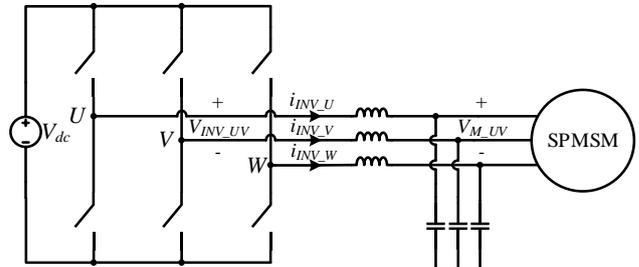


그림1 정현파 필터를 포함하는 3상 전동기 구동 시스템
 Fig.1 3-Phase motor drive system with the sine filter

2.2 정현파 필터 설계

기생저항을 포함한 정현파 필터의 상당 등가회로는 그림 2와 같다. 이 때 정현파 필터의 인버터 측 전압과 부하측 전압의 관계의 전달 함수는 식 (1)과 같다.

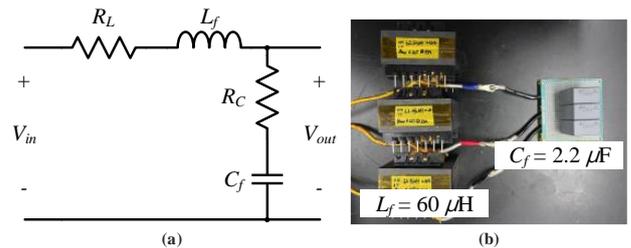


그림2 정현파 필터 (a) 정현파 필터 상당 등가회로 (b) 정현파 필터 사진
 Fig.2 Sine filter (a) Equivalent single-phase circuit of the sine filter (b) Photograph of Sine filter

$$G(s) = \frac{R_c C_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f (R_L + R_c) s + 1} \quad (1)$$

정현파 필터는 LC 필터로 LPF(Low Pass Filter) 역할을 한다. 필터 설계 시 차단 주파수는 기본파의 주파수보다 크게 설정하여 출력 전압의 크기와 위상의 변화가 없게 한다. 또한 정현파 필터의 공진 주파수는 스위칭 주파수의 1/4 정도가 되게 선정하여 스위칭 주파수 영역에서 공진이 일어나지 않도록 한다.

정현파 필터 제정 수는 정격 동작점에서 필터 인덕턴스로 인한 전압 강하가 0.1 pu 이하가 되도록 선정해야 하며 필터 커패시턴스는 선정된 공진 주파수를 만족하도록 한다.[2] 실험 조건에서 따라 선정된 정현파 필터의 제정 수는 표 1과 같다.

3. 실험 결과

본 논문에서는 제안한 정현파 필터의 누설 전류 저감에 대한 유효성을 실험을 통해 검증한다. 실험에 사용한 GaN HEMT는 TI 社의 LMG3422R030이며 SiC MOSFET은 Wolfspeed 社의 C3M0025065K를 사용했다. 이 때 GaN HEMT의 빠른 스위칭 특성을 이용하기 위해 SiC MOSFET 보다 데드타임을 짧게 설정하였다.

표 1 정현파 필터를 포함하는 모터 구동 시스템 제정 수

Table 1 parameters of the motor drive system with sine filter

직류 링크 전압	200 V	출력 용량	5 kW
출력 주파수	133 Hz	L_f	60 μ H
f_{sw}	40 kHz	C_f	2.2 μ F
t_{dt_GaN}	100 ns	t_{dt_SiC}	250 ns

그림 4는 정현파 필터를 포함한 GaN HEMT 인버터의 실험 파형이다. 여기서 필터를 통과하기 전의 인버터 출력 선간 전압 V_{INV_UV} 는 고조파 성분과 기본파 성분이 함께 출력되지만 필터를 지난 후 모터 인가 선간 전압 V_{MLUV} 은 PWM 성분이 제거되어 전동기 동작 기본파 성분만 출력됨을 확인했다. 이를 통해 정현파 필터가 안정적으로 구동됨을 판단할 수 있다.

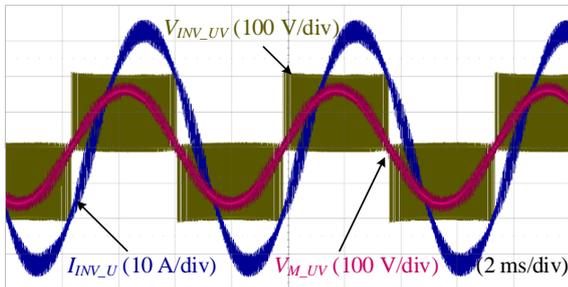


그림4 정현파 필터를 포함한 GaN HEMT 인버터의 실험 파형
Fig.4 Experimental result of GaN HEMT inverter with sine filter

그림 5의 (a)에서 전동기 구동 시 정현파 필터가 적용된 SiC MOSFET 인버터의 누설 전류는 5 MHz 대역에서 3.44 mA 감소한다. (b)에서 정현파 필터가 적용된 GaN HEMT 인버터의 누설 전류는 5 MHz 대역에서 4.20 mA 감소한다. 정현파 필터 적용시 누설전류 감소를 확인할 수 있다.

그림 5의 (c)에서 필터를 적용하기 전 GaN HEMT 인버터의 누설 전류가 2.49 mA만큼 크다. (d)에서 필터를 적용한 후 GaN HEMT 인버터의 누설 전류가 0.08 mA만큼

크다. GaN HEMT의 경우 빠른 스위칭 특성으로 인해 누설 전류 크기가 SiC MOSFET에 비해 큼을 확인할 수 있다.

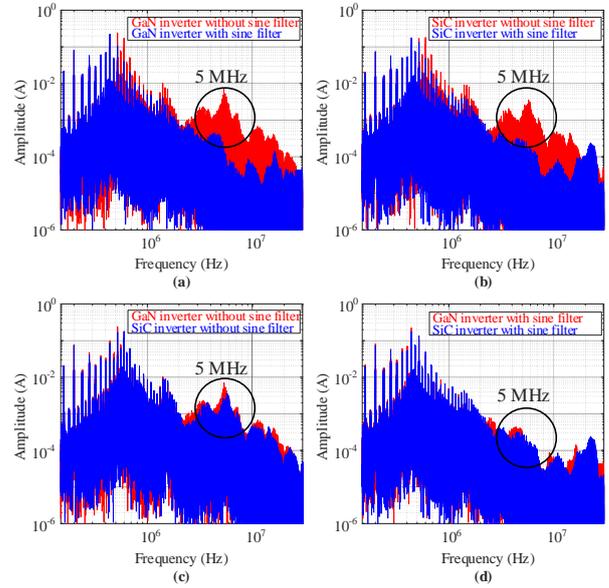


그림5 누설 전류 비교 (a) 정현파 필터 유무에 따른 GaN 인버터 (b) 정현파 필터 유무에 따른 SiC 인버터 (c) 정현파 필터 적용 전 GaN, SiC 인버터 (d) 정현파 필터 적용 후 GaN, SiC 인버터

Fig.5 Comparison of a leakage current spectrum (a) GaN inverter without or with sine filter (b) SiC inverter without or with sine filter (c) GaN or SiC inverter without sine filter (d) GaN or SiC inverter with sine filter

4. 결론

본 논문에서는 WBG 전력 반도체 기반 모터 구동 시스템의 높은 dv/dt를 저감하기 위한 정현파 필터를 설계하였다. 그 후 실험을 통해 설계한 정현파 필터 동작을 검증하였다. 실험 결과를 바탕으로 GaN HEMT, SiC MOSFET 기반 인버터의 정현파 필터 유무에 따른 누설 전류를 비교한 결과 정현파 필터를 적용할 경우 누설 전류가 저감됨을 확인하였다. 또한 WBG 소자 종류에 따른 누설 전류를 비교한 결과 GaN HEMT의 빠른 스위칭 특성으로 인해 SiC MOSFET보다 누설 전류의 크기가 큼을 확인하였다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

참고 문헌

- [1] S. Beak, Y. Cho, B. -G. Cho and C. Hong, "Performance Comparison Between Two-Level and Three-Level SiC-Based VFD Applications With Output Filters", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 5, pp. 4770-4779, 2019, Sept.-Oct.
- [2] M. Liserre, F. Blaabjerg and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1281-1291, 2005, Sept.-Oct.