

# BLDC 모터의 PWM 방법과 파워소자에 따른 인버터 손실분석

남명준\*, 조관열\*, 김학원\*, 엄상준\*\*, 김영진\*\*, 김기만\*\*

\*한국교통대학교 제어계측공학과, \*\*LG전자

## Analysis of Inverter Losses of Brushless DC Motor According to PWM Method and Power Devices

Myung Joon Nam\*, Kwan Yuhl Cho\*, Hag Wone Kim\*, Sang Joon Eum\*\*

Young Jin Kim\*\*, Ki Man Kim\*\*

\*Korea National University of Transportation, \*\*LG Electronics

### ABSTRACT

In this paper, the inverter switch losses of BLDC motor for three types of PWM method and power devices was analyzed. When BLDC motor is driven at low currents, inverter switch losses for MOSFET is low because MOSFET operates like resistance. But, inverter switch losses for IGBT is higher than MOSFET due to its large turn off losses. For low power inverter with MOSFET, the power losses of unified PWM is lower than that of unipolar and bipolar PWM.

### 1. 서론

최근 에너지 자원 부족 및 에너지 사용량의 증가로 인해 지속적인 에너지 부족 현상을 겪고 있다. 이를 해결하기 위해 에너지 소비를 최소화시키기 위한 여러 방법들이 제시되고 있는데, 냉장고, 에어컨 등의 가전기기에서는 에너지 소비효율 등급 기준이 강화되고 있으며 전력소모량에 대한 소비자의 관심이 증대되고 있다. 따라서 냉장고, 에어컨의 압축기에 적용되고 있는 BLDC 모터의 효율을 개선하기 위한 연구는 많이 진행되어 왔으나 인버터의 손실저감을 위한 연구는 미미한 실정이다.

본 논문에서는 냉장고 압축기용 BLDC 모터에 인가되는 전압 및 전류를 제어하기 위한 단극성(Unipolar) PWM, 양극성(Bipolar) PWM 및 단일화(Unified) PWM의 3가지 PWM 방법에 대해 인버터 스위치로 MOSFET과 IGBT를 사용할 경우 인버터 스위치의 손실을 분석하고 손실을 최소화 할 수 있는 제어방법을 제시한다.

## 2. BLDC 모터의 PWM 방법에 따른 손실분석

### 2.1 BLDC 모터의 PWM 방법

BLDC 모터의 전압을 제어하기 위한 PWM 방법은 그림 1과 같이 단극성 PWM, 양극성 PWM 및 단일화 PWM의 3가지로 구분할 수 있다.<sup>[1]</sup> 단극성 PWM의 경우 인버터의 상단(Top) 스위치 또는 하단(Bottom) 스위치만을 사용하여 인버터의 출력전압을 제어하는 방법으로 한 상의 스위칭 동작은 하나의 스위치만에 의해 이루어진다. 따라서 단극성 PWM은 상전류 맥동이 작고 스위칭손실이 적게 발생하지만, 전압을 역으로 인가할 수 없기 때문에 빠른 감속운전에 제한을 받는다. 양극성 PWM의 경우 인버터의 상단 및 하단 스위치를 모두 이용하여

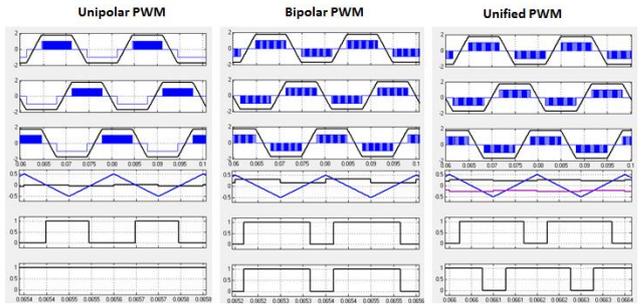


Fig. 1 Methods of BLDC PWM

인버터 출력전압을 제어하기 때문에 감속운전에 제한을 받지 않으나 전류맥동이 크고, 스위칭손실이 크게 발생한다. 단일화 PWM(Unified PWM)은 2개의 기준신호를 캐리어신호와 비교하는 PWM 방법으로 단극성 PWM과 양극성 PWM의 장점을 갖기 때문에 작은 전류맥동으로 감속제어가 가능한 전압제어 방법이다.<sup>[1],[2]</sup> 양극성 PWM과 단일화 PWM의 경우 인버터 3상의 상단 스위치와 하단 스위치는 서로 상보(Complimentary) 적으로 이루어지므로 환류전류를 다이오드가 아닌 MOSFET를 통해 낮은 임피던스에서 처리 할 수 있다. 이 방법은 저항소자처럼 동작하는 MOSFET에서 사용 가능하지만, IGBT는 단일 채널로 동작되므로 사용 불가능하다.

### 2.2 스위칭 소자의 손실계산

MOSFET과 IGBT, 역병렬 다이오드에서 발생하는 스위치 손실은 도통손실(Conduction loss)과 스위칭손실(Switching loss)로 구분할 수 있으며 각각의 스위치 손실은 데이터시트의 정보를 근거로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{FET} &= E_{con} + E_{sw} = i_d^2 R_{ds(on)} T_{on} + (E_{on} + E_{off}) f \\ E_{IGBT} &= E_{cond} + E_{sw} = V_{CE(sat)} i_C T_{on} + (E_{on} + E_{off}) f \\ E_{DIODE} &= E_{cond} + E_{sw} = V_d i_d T_{on} + E_{rr} f \end{aligned} \quad (1)$$

MOSFET과 IGBT는 환류전류를 위한 역병렬 다이오드와 함께 구성되므로 MOSFET과 IGBT에서 발생하는 스위치 손실은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 MOSFET의 도통손실은 전류의 제곱과 저항에 비례하므로 MOSFET의  $R_{ds(on)}$  과 전류가 작은 경우에 그 손실이 매우 작아짐을 알 수 있다. 반면에

IGBT에 경우는 그러한 효과를 볼 수 없다.

$$E_{FET\_} \quad (2)$$

### 2.3 모의해석 결과

그림 2는 냉장고 압축기용 BLDC 모터의 인버터 스위치손실을 분석하기 위한 회로구성을 나타낸다. 모의해석을 위해 제어기는 Matlab/Simulink로 구현하고 인버터 스위치 및 BLDC 모터는 PSIM으로 구현하였다. BLDC 모터는 4극, 60W 3상으로 냉장고용 압축기의 주 운전영역인 저속, 저부하 조건에서의 손실분석을 위하여 상전류는 0.19Arms에서 손실을 분석한다. 인버터의 스위칭 주파수는 5kHz, MOSFET의  $R_{DS(on)} = 0.95\Omega$ , IGBT의  $V_{CE(sat)} = 1.6V$ , DIODE의  $V_{SD} = 1.5V$  이다.

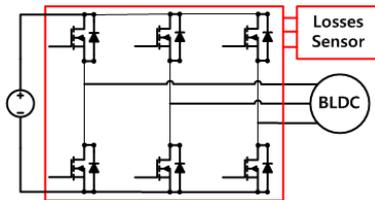


Fig. 2 BLDC motor drive system

그림 3은 MOSFET을 사용할 경우, 그림 4는 IGBT를 사용할 경우 각각 PWM 방법에 따른 상전류 및 스위치 손실과형을 나타낸다. 인버터 스위치로 MOSFET을 사용할 경우 표 1에 나타난 바와 같이 단극성 PWM은 환류전류가 다이오드를 통해 흐르기 때문에 다이오드 손실이 크게 발생한다. 양극성 PWM의 경우 각 상의 스위칭 동작이 상보적으로 일어나기 때문에 환류전류가 트랜지스터를 통해서 흐르게 되므로 다이오드 손실은 적게 나오는 반면, MOSFET에서의 도통손실 및 스위칭손실은 증가한다. 단일화 PWM의 경우 환류전류를 MOSFET을 통해 흐르게 하고, 양극성 PWM보다 적은 스위칭 횟수를 갖기 때문에 적은 손실이 발생함을 알 수 있다.

인버터 스위치로 IGBT를 사용할 경우 표 2에 나타난 바와 같이 단극성 PWM의 경우 IGBT의 Turn off 손실에 의하여 IGBT의 스위치 손실이 크게 발생함을 알 수 있다. 양극성 PWM의 경우 환류전류는 단극성 PWM과 같게 흐르므로 도통손실은 차이가 없지만, 스위칭 손실이 증가하여 단극성 PWM 보다 스위치 손실이 크게 나타난다. 단일화 PWM 또한 양극성 PWM 보다 스위칭 횟수는 적지만 단극성 PWM 보다는 많으므로 단극성 PWM 보다 스위치 손실이 크게 나타난다.

### 3. 결론

본 논문에서는 BLDC 모터의 저전류 구동 시 PWM 방법별, 파워 소자별 인버터의 스위치 손실을 분석하고 시뮬레이션으로 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 저전류에서 환류전류를 MOSFET을 통해 흘려주면 저항소자로 동작하는 MOSFET 특성상 적은 손실이 발생함을 알 수 있고, IGBT의 경우 단일채널로 동작하기 때문에 손실량은 스위칭 횟수에 비례함을 알 수 있다. 따라서 냉장고와 같이 고전압, 저전류로 상시 동작하는 제품의 경우 단일화 PWM과 같이 환류전류를 효율적으로 처리할 수 있는 PWM 방법을 사용하면 인버터 스위치의 손실을 절감할 수 있다.

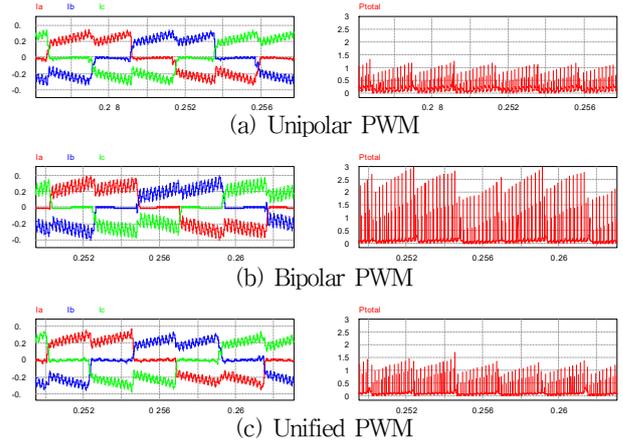


Fig. 3 Phase currents and power losses for MOSFET

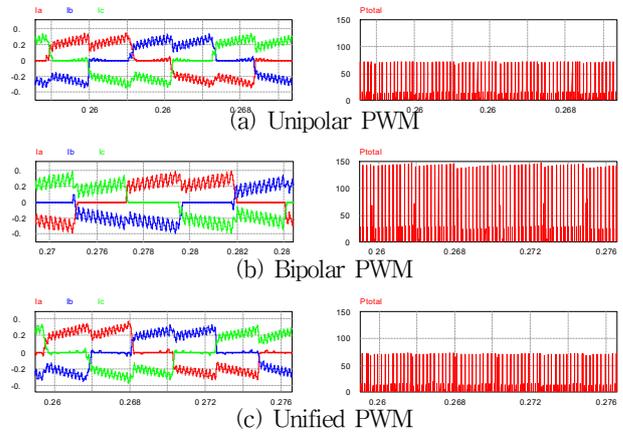


Fig. 4 Phase currents and power losses for IGBT

Table. 1 Switch losses for MOSFET (Unit : mW)

Method	P_tr	P_diode	P_total
Unipolar PWM	61.8	104.4	166.2
Bipolar PWM	97.8	6.7	104.5
Unified PWM	89.3	10.2	99.5

Table. 2 Switch losses for IGBT (Unit : mW)

Method	P_tr	P_diode	P_total
Unipolar PWM	626.8	182.0	808.8
Bipolar PWM	1,010.4	222.0	1,232.4
Unified PWM	638.8	185.6	824.4

이 논문은 (주)LG전자의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] H. W. Kim, H. G. Shin, Y. G. Lee, and K. Y. Cho. "Novel PWM method with low ripple current for position control applications of BLDC motors," Journal of Power Electronics, Vol. 11, No. 5, pp. 726-733, September 2011.
- [2] T. S. Jin, H. K. Shin, H. W. Kim, H. S. Mok, and K. Y. Cho. "PHEV(plug in hybrid electric vehicle)의 클러치 구동 시스템을 위한 BLDC 모터의 위치제어기," 전력전자학회논문지, Vol 17, No. 2, pp. 166-173, April 2012.