

변조 기법에 따른 SiC 기반의 인버터 시스템에서 접합 온도의 변화 분석

강병우*, 박문겸*, 최혜원*, 이교범*
아주대학교

Analysis of Junction Temperature in a SiC Inverter System with Variable Modulation Techniques

Byeong-Woo Kang*, Mun-Gyeom Park*, Hye-Won Choi*, and Kyo-Beum Lee*
Ajou university

ABSTRACT

본 논문에서는 변조 기법에 따른 SiC 기반의 인버터 시스템에서 접합 온도의 변화를 분석한다. 전력반도체 소자의 접합 온도는 소자의 수명에 직결된 문제로서 인버터 시스템의 신뢰성 향상에 중요하다. SiC 기반 전력반도체 소자의 손실을 분석하고 열 등가 회로를 통해 발생한 손실에 따라 변동하는 접합 온도를 모델링 한다. 이를 기반으로 전압 변조 기법에 따른 시스템의 손실을 계산하고 소자의 접합 온도를 추정한다. 전압 변조 기법에 따른 전력 손실의 차이를 비교하고 전력 손실에 따른 온도 모델링을 통해 SiC 기반 전력반도체 소자의 온도 변화를 분석한다. 분석한 전압 변조 기법에 따른 온도 변화의 분석에 대한 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

Si 기반의 IGBT는 Turn-off 시간의 지연으로 발생하는 테일 전류와 같은 스위칭 손실로 인해 고주파 스위칭에 부적합하다^[1]. WBG (Wide band-gap) 소자 중 하나인 SiC 기반의 MOSFET은 넓은 밴드 갭 및 빠른 전자 포화 속도와 같은 우수한 전기적 특성으로 인해 Si 기반의 IGBT보다 더 높은 전압과 스위칭 주파수에서 동작한다^[2]. SiC 기반의 MOSFET을 적용한 인버터 시스템은 고주파 스위칭을 통해 출력 품질이 향상된다^[3].

인버터 시스템의 효율 및 신뢰성 문제는 온도가 주된 요인이다. 전력 반도체 소자의 접합 온도의 변동은 내부 재료 층 간의 수축과 팽창을 발생시켜 스위칭 오동작의 원인이 된다. 이러한 기계적 응력으로 인한 신뢰성 문제를 막기 위하여 접합 온도의 추정 및 저감을 위한 연구가 진행되고 있다^[4]. 대표적인 접합 온도의 저감 방법으로 스위칭 주파수 조절, 전압 변조 기법의 변경 등이 있다^[5]. 이러한 방법 중에서 전압 변조 기법의 변경을 통해 온도를 조절하면 추가적인 장치와 비용 없이 온도 저감이 가능하다. 일반적인 전압 변조 기법인 공간 벡터 변조 기법(Space vector pulse width modulation, SVPWM)은 유효 전압 벡터를 스위칭 주기의 정중앙에 배치하여 출력 전류의 품질이 우수하다. 반면에, 불연속 변조(Discontinuous pulse width modulation, DPWM) 기법은 특정 구간에서 스위칭을 하지 않는 지령 전압의 불연속 구간을 배치하여 SVPWM 기법에 비해 전력 손실이 감소되지만, 출력 전류의 THD가 증가한다.

본 논문에서 WBG 소자를 활용한 인버터 시스템의 전압 변조 기법에 따른 접합 온도의 변화를 확인한다. SVPWM 기법과

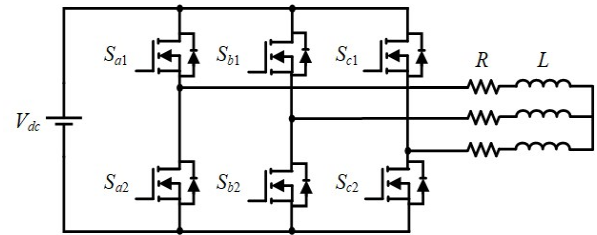


그림1 2-레벨 인버터의 회로도
Fig.1 The circuit diagram of a 2-level inverter

DPWM 기법에 따른 전력 반도체 소자의 손실을 비교하고 접합 온도 변화를 분석한다. SiC 기반 전력 반도체 소자의 손실을 기반으로 열 등가회로 중 하나인 Foster Model를 활용하여 변동하는 접합 온도를 추정한다. 전압 변조 기법에 따른 전력손실을 통해 추정된 온도의 변화를 분석하고 그에 대한 타당성을 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

2. SiC inverter의 전압 변조 기법

그림 1과 같은 2레벨 인버터의 출력 측에 지령 전압과 동일한 크기 및 주파수의 출력 전압이 나오도록 전압 변조 기법을 사용한다. 본 논문에서는 대표적인 전압 변조 기법인 SVPWM기법과 DPWM 기법에 대해 다룬다.

2.1 SVPWM(Space Vector PWM)

SVPWM 기법은 3상 전압 지령을 각 상마다 개별적으로 변조하는 다른 변조 기법과는 달리 복소수 공간에서 하나의 공간 벡터로 표현하여 전압을 변조하는 기법이다. SVPWM 기법은 유효 전압 및 영 전압 벡터의 인가 시간을 연산하여 구현하는 방식과 오프셋(offset) 전압을 활용한 구현 방식이 있다. 유효 전압 벡터를 인가하는 위치에 따라 스위칭 횟수와 리플 전류의 크기는 변동된다. 본 논문에서 사용하는 대칭 공간 벡터 전압 변조 기법(Symmetrical SVPWM)은 유효 전압 벡터의 위치를 스위칭 주기의 정 중앙에 배치하여 고조파 특성이 가장 우수하다. 하지만, 이 기법은 전압 벡터의 인가 시간을 구하는데 많은 연산 시간이 요구된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 오프셋 전압을 이용한 삼각파 비교 전압 변조 기법을 활용한다. 이 기법은 오프셋 전압이라 불리는 영상분 신호(Zero-sequence signal)를 이용하여 극전압의 형태를 바꾸어 등가적으로 SVPWM 기법을 구현한다.

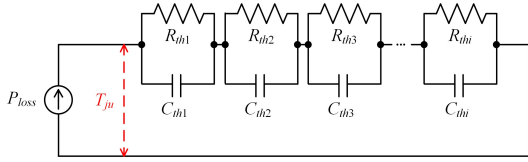


그림 2 포스터 네트워크 온도 모델 회로
Fig.2 Circuit of Foster Model

2.2 DPWM(Discontinuous PWM)

DPWM은 그림 1에서 3상 중 2상만을 스위칭하여 스위칭 횟수를 감소시키는 변조 방식이며 스위칭을 하지 않는 불연속 구간의 배지에 따라 스위칭 손실과 고조파 특성이 변동된다. 스위칭 손실의 저감을 위해 지령 전압의 한 주기 동안 상전류가 최대인 구간에서 불연속 구간을 배치한다. 이러한 불연속 구간은 각 상의 지령 전압의 한 주기 중 최대 120°까지 설정이 가능하다. 본 논문에서 사용된 30°, 40°, 60° DPWM은 상전압의 크기가 가장 크거나 가장 작은 구간 동안 스위칭하지 않는 불연속 구간을 가지며, 불연속 구간에 따라 출력 전류의 THD와 스위칭 손실이 변동된다.

3. SiC MOSFET 온도의 추정

3.1 SiC MOSFET의 손실

SiC MOSFET의 전력 손실 P_{loss} 는 스위칭 동작에 의해 발생되므로 스위칭 함수 $S(k)$ 로 표현이 가능하다. 식 (1)에서 k 는 이산 샘플링 변수를 의미한다.

$$S(k) = \begin{cases} 1 & (\text{Turn ON}) \\ 0 & (\text{Turn OFF}) \end{cases} \quad (1)$$

P_{loss} 는 전도 손실 P_{cond} 와 스위칭 손실 P_{sw} 로 구성된다. P_{cond} 는 스위칭 소자에 드레인 전류 i_D 가 도통되는 동안 내부 저항 $R_{DS(on)}$ 으로 인해 발생하는 손실을 의미하며 식 (2)로 표현된다. 식 (2)에서 t_{sw} 는 스위칭 주기, t_{cd} 는 스위치가 ON되는 시간을 의미한다.

$$P_{cond} = i_D^2 \cdot R_{DS(on)} \cdot (t_{cd} / t_{sw}) \cdot S(k) \cdot S(k-1) \quad (2)$$

P_{sw} 는 i_D 와 v_{DS} 의 변동 구간인 스위칭 과도 상태에서 발생하는 손실이다. P_{sw} 를 구성하는 손실은 게이트 전하 손실 P_g , 출력 커패시턴스 손실 P_{cos} , 역 회복 손실 P_{rr} , 턴-온 손실 P_{on} , 턴-오프 손실 P_{off} 이 있다. P_g 는 입력 커패시턴스 C_{iss} 의 충전에 따라 v_{GS} 가 V_{th} 까지 도달하는 시간이 지연되어 발생된다. C_{iss} 의 충전 속도는 전력 장치의 특성과 작동 환경에 따라 결정된다. P_g 는 식 (3)과 같이 표현되며 Q_g 는 게이트 전하, V_G 는 게이트 전압, f_{sw} 는 스위칭 주파수를 의미한다.

$$P_g = Q_g \cdot V_G \cdot f_{sw} \cdot [S(k) \cdot \{S(k) - S(k-1)\}] \quad (3)$$

V_{DS} 에 따라 변동하는 기생 출력 커패시턴스 C_{oss} 인 C_{gd} 와 C_{ds} 의 충전에 의해 스위치가 ON상태 혹은 OFF상태로 도달하는 시간이 지연되어 P_{oss} 가 발생된다. P_{oss} 는 식 (4)와 같이 표현되며 V_{BUS} 는 DC 입력 전압이다.

$$P_{oss} = \int_0^{V_{BUS}} v_{DS} \cdot C_{oss} dv_{DS} \cdot f_{sw} \cdot [S(k) - S(k-1)] \quad (4)$$

표 1 SVPWM, DPWM 기법의 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters of SVPWM, DPWM technique

| 부하 저항 | 10 Ω | 입력 전압 | 600 V |
|---------|--------|---------|----------------------|
| 부하 인덕턴스 | 1.5 mH | 지령 전류 | 20 A _{peak} |
| 기본파 주파수 | 60 Hz | 스위칭 주파수 | 10 kHz |

전력 변환 시스템에서 인가한 데드 타임 동안 스위치의 내부 역 방향 다이오드의 역 회복 현상으로 인해 P_{rr} 이 발생된다. 식 (5)에서는 Q_{rr} 은 역회복 전하이다.

$$P_{rr} = \frac{1}{2} V_{DS} \cdot Q_{rr} \cdot f_{sw} \cdot [S(k) - S(k-1)] \quad (5)$$

스위치가 ON이나 OFF상태에 도달하는 시간인 t_{on} , t_{off} 동안 P_{on} 과 P_{off} 가 발생된다. 식 (6), (7)과 같이 P_{on} 과 P_{off} 는 표현되며 t_{ri} 과 t_{rv} 는 i_D 와 v_{DS} 의 상승 시간, t_{fi} , t_{fv} 는 i_D 와 v_{DS} 의 하강 시간을 의미한다.

$$P_{on} = \frac{1}{2} v_{DS} \cdot i_D \cdot (t_{ri} + t_{fv}) \cdot f_{sw} \cdot [S(k) \cdot \{S(k) - S(k-1)\}] \quad (6)$$

$$P_{off} = \frac{1}{2} v_{DS} \cdot i_D \cdot (t_{fi} + t_{rv}) \cdot f_{sw} \cdot [S(k-1) \cdot \{S(k-1) - S(k)\}] \quad (7)$$

3.2 온도 추정

전력 손실을 통해 스위치 소자의 열적 상태를 전기적인 회로의 개념으로 해석하기 위해 열 등가회로(Thermal Equivalent Circuit)가 필요하다. 그림 2는 열 저항 및 열 용량인 R_{th} 와 C_{th} 로 구성된 Foster Model이다. Foster Model에서 접합 온도 T_{ju} 와 전력 손실 P_{loss} 는 R_{th} 와 C_{th} 를 통한 전압 차이와 전류를 의미한다. R_{th} 와 C_{th} 는 데이터 시트의 정보를 기반으로 계산된 값이며 각각 온도 변화의 크기와 각 층의 열 관성 효과를 의미한다. Foster Model의 열 임피던스 Z_{th} 는 순간적인 전력 손실로 인한 접합 온도의 변화를 계산하는데 활용된다. 열 임피던스를 주파수 영역에서 표현한 $Z_{th}(s)$ 는 SiC 기반의 MOSFET에서 물질의 열 전도도를 설명하는 매개 변수로 사용되며 식 (8)과 같이 표현된다.

$$Z_{th}(s) = \frac{1}{sC_{th} + \frac{1}{R_{th}}} \quad (8)$$

이전 주기의 온도 변화량 $\Delta T_{ju}(k-1)$ 은 식 (9)와 같이 추정할 수 있다. 추정된 이전 주기의 접합 온도 $T_{ju}(k-1)$ 에 현재 주기의 온도 변화량 $\Delta T_{ju}(k)$ 을 더하여 현재 주기의 접합 온도 $T_{ju}(k)$ 에 대한 식 (10)을 도출한다. 식 (10)에서 i 는 Foster Model의 R_{th} 와 C_{th} 가 있는 각 층이며 T_s 는 샘플링 시간을 의미한다.

$$\Delta T_{ju}(k-1) = \sum_{i=1}^m \{P_{loss}(k-1) \cdot Z_{thi}\} \quad (9)$$

$$T_{ju}(k) = \sum_{i=1}^m \{T_{ju}(k-1) \cdot e^{-\frac{T_s}{R_{thi}C_{thi}}}\} + \Delta T_{ju}(k) \quad (10)$$

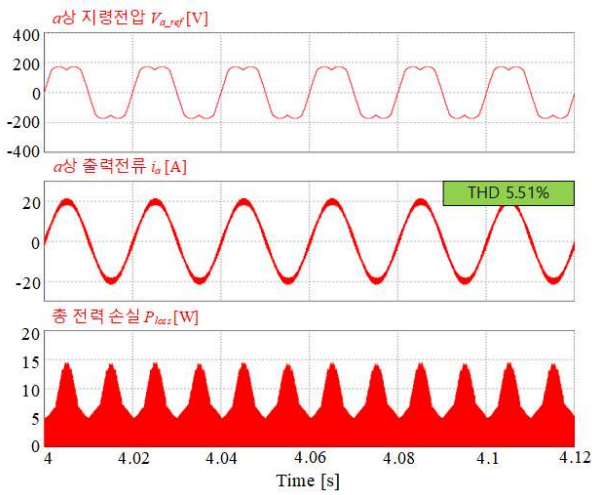


그림 3 SVPWM 기법에 따른 전력손실과 접합 온도
Fig. 3 Power loss and junction temperature with SVPWM technique

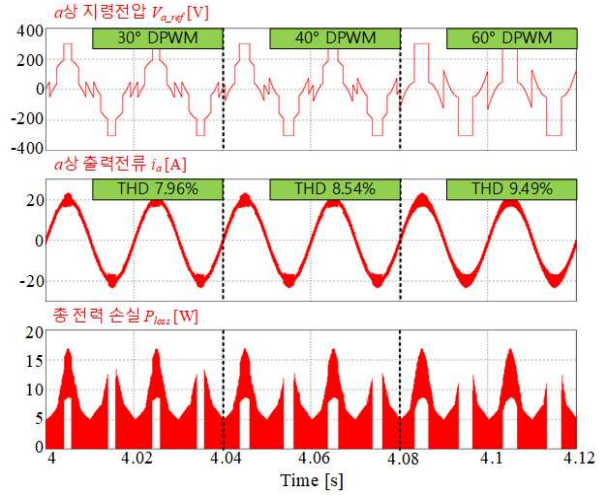


그림 5 DPWM 기법에 따른 전력손실과 접합 온도
Fig. 5 Power loss and junction temperature with DPWM technique

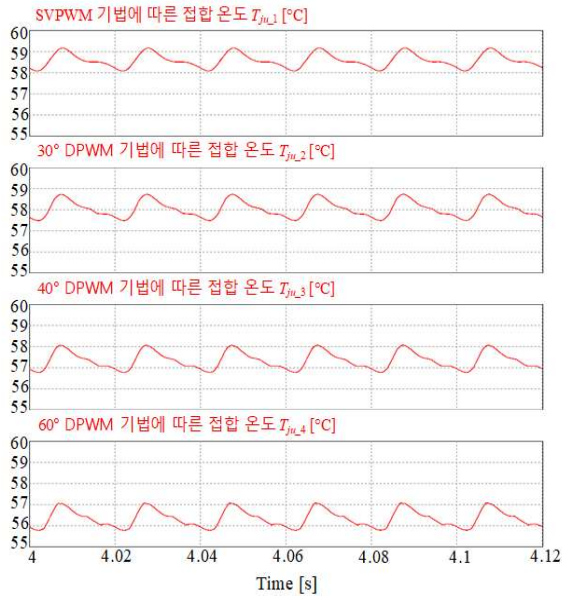


그림 4 변조 기법에 따른 접합 온도
Fig. 4 Junction temperature with modulation techniques

4. 시뮬레이션

본 논문에서 SVPWM과 DPWM 기법에 따른 손실 및 접합 온도의 차이를 분석하기 위해 시뮬레이션을 진행했다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터는 표 1과 같이 설정했다. 각 전압 변조 기법에 따른 손실 및 접합 온도를 연산하기 위해 FS28MR12W1M1H_B11의 데이터 시트에 있는 파라미터를 적용하였다. 60° DPWM 기법을 적용하는 경우 SVPWM 기법의 스위칭 손실이 최대 38.46%만큼 감소하였다. 30° DPWM 기법에 비해 40°와 60° DPWM 기법의 THD는 9.49%까지 증가하지만, 접합 온도는 최대 2.1°C까지 저감하였다. 시스템의 수명을 고려하는 경우 온도 저감을 위한 DPWM의 불연속 구간은 40°에서 60°가 바람직하다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서 SiC 기반의 인버터 시스템에 적용한 전압 변조 기법에 따라 변동하는 접합 온도를 분석하였다. SiC 기반의 전력반도체 소자의 전도 손실, 스위칭 손실, 역회복 손실, 기생 커패시터에 의한 손실을 분석하였다. 이를 기반으로 포스터 모델을 이용해 SiC MOSFET의 접합 온도를 추정하였다. 각 PWM 기법에 따라 SiC 기반의 인버터 시스템에서 발생한 전력 손실의 차이와 접합 온도의 변동을 분석하였다. 분석한 전압 변조 기법에 따른 온도 변화의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] I.-H. Lee and K.-B. Lee, "Junction Temperature Estimation of SiC MOSFETs in Three-Level NPC Inverters," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1607–1617, Oct. 2023.
- [2] S. Hazra, A. De, L. Cheng, J. Palmour, M. Schupbach, B. A. Hull, S. Allen, and S. Bhattacharya, "High Switching Performance of 1700-V, 50-A SiC power MOSFET over Si IGBT/Si MOSFET for Advanced Power Conversion Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 7, pp. 4742–4754, Jul. 2016.
- [3] J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. Perez-Tomas, and J. Rebollo, "A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 5, pp. 2155–2163, May 2014.
- [4] I.-H. Lee, S.-M. Park, and K.-B. Lee, "Junction Temperature Estimation of Direct-Drive GaN HEMTs in Two-Level Inverters for Driving PMSM Through Power Loss Analysis," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 19, no. 4, pp. 2205–2216, May 2024.
- [5] M. Andresen, K. Ma, G. Buticchi, J. Falck, F. Blaabjerg, and M. Liserre, "Junction Temperature Control for More Reliable Power Electronics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 765–776, Jan. 2018.