

문턱전압과 밀러플래토 전압을 통한 스위치 소자의 손실 분석

박세희, 성호재, 현승욱, 원충연
성균관대학교

Analysis of Switch Device Losses through Threshold Voltage and Miller Plateau Voltage

Sae Hee Park, Ho Jae Seong, Seung Wook Hyun, Chung Yuen Won
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

ABSTRACT

This paper analyzes switch Device losses and efficiency depending on SiC and Si devices. The switch devices loss is compared to Si and SiC based elements through Threshold Voltage and Miller Plateau Voltage. And analyzed through comparison of each switching loss by experiment.

1. 서 론

최근 주목받고 있는 전력 반도체 소자인 SiC 소자는 넓은 밴드갭으로 인해 높은 전압 특성에 유리한 특성과 높은 열전도도로 발열에 따른 냉각시스템을 간단화시켜 전체적인 시스템의 소형 및 경량화가 가능하다는 장점이 있다. 또한 높은 절연과 피전계 전계강도를 가지는 장점으로 적은 동작 손실의 고전압 소자를 구현 가능하게 되는 유리한 장점을 가지고 있다. 이와 같은 장점으로 SiC 소자는 높은 문턱전압과 적은 손실을 가지며 우수한 열 방출특성과 고온에서 사용 가능하며 전체적인 시스템의 소형화가 가능해진다.

본 논문은 동일한 스위칭 주파수에서 문턱전압과 밀러플래토 전압에 따른 SiC기반 소자와 Si기반 소자의 손실을 비교한 후 분석한다.

2. 스위치 분석

2.1 스위치 모드 분석

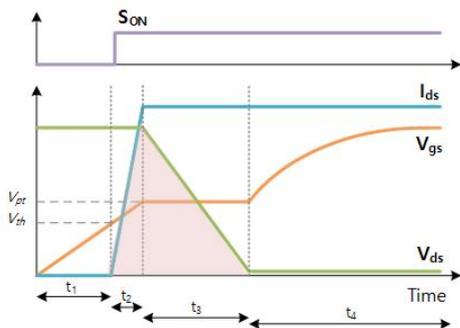


그림 1. 스위치 소자의 턴-온 특성파형
Fig. 1. Turn-on Characteristic Waveform of Switch device

그림 1은 스위치 소자의 턴 온 특성파형을 나타낸다. V_{gs} 이 인가되며 V_{th} 에 도달하였을 때 스위치가 턴 온되며 이때 I_{ds} 가 흐르기 시작한다. 또한 V_{gs} 이 Full 부하에서 전류가 포화되는 영역인 Miller Plateau영역이 되는 V_{pt} 에 도달하면 V_{ds} 은 하강하기 시작한다. 이때 전압·전류 교차영역이 스위치 손실영역이 된다. 따라서 스위치 손실은 V_{th} 과 V_{pt} , 그리고 시간 t_3 의 영향을 받게 된다.

2.2 문턱전압 및 밀러플래토 전압 수식 분석

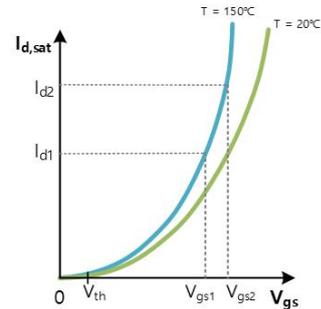


그림 2. 스위치 소자 $I_{d,sat} - V_{gs}$ Curve
Fig. 2. $I_{d,sat} - V_{gs}$ Curve of Switch device

그림 2를 보면 $I_{d,sat} - V_{gs}$ Curve는 이차방정식 $y = A(x - B)^2 + C$ 로 간단화할 수 있으며 이때 그래프의 범위는 $x \geq V_{th}$ 이다. 이때 B 는 x 절편으로 V_{th} ,이며 C 는 y 절편으로 0으로 나타낸다.

$$I_d = A(V_{gs} - V_{th})^2 \quad (1)$$

따라서 위 식을 바탕으로 I_d 에 관한 식으로 정리하면 식 (1)로 정리가 된다. 이때 임의의 두 점 (V_{gs1}, I_{d1}) , (V_{gs2}, I_{d2}) 을 잡아 식 (1)에 대입하여 문턱전압(V_{th})에 관한 식으로 정리하면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$V_{th} = \frac{V_{gs1} \cdot \sqrt{I_{d2} - V_{gs2} \cdot \sqrt{I_{d1}}} + V_{gs2} \cdot \sqrt{I_{d1} - V_{gs1} \cdot \sqrt{I_{d2}}}}{\sqrt{I_{d2}} - \sqrt{I_{d1}}} \quad (2)$$

또한 Full 부하에서 전류가 포화 되었을 때 영역인 Milier Platea 영역의 전압에 관한 식을 위와 같은 방법으로 정리하였을 때 식 (3)와 같이 정리된다.

$$V_{pt} = V_{th} + \sqrt{\frac{I_{fl}}{A}} \quad (3)$$

2.3 스위치 소자 문턱전압 및 밀러플레토 전압

V_{DS}	1.2 kV	$V_{CES} = 1200V$ $I_{C\ nom} = 100A / I_{CRM} = 200A$
$E_{SW, Total @ 50A, 150^\circ C}$	1.7 mJ	
$R_{DS(on)}$	25 mΩ	

그림 3 50A와 100A 정격을 가지는 SiC와 Si 스위치 소자
Fig. 3 Switch element rated at 50A and 100A

앞서 구한 식 (2), (3)에 50A의 정격을 가지는 스위치 소자의 datasheet를 기반으로 각 소자의 문턱전압과 밀러플레토 전압을 구해보면 다음과 같다.

i) 50A

$$V_{th} = \frac{7.8 \cdot \sqrt{60} - 9.2 \cdot \sqrt{30}}{\sqrt{60} - \sqrt{30}} = 4.4206 [V] \quad (4)$$

$$V_{pt} = 4.4206 + \sqrt{\frac{50}{2.627}} = 8.7833 [V] \quad (5)$$

ii) 100A

$$V_{th} = \frac{8.6 \cdot \sqrt{60} - 9.3 \cdot \sqrt{30}}{\sqrt{60} - \sqrt{30}} = 6.69103 [V] \quad (6)$$

$$V_{pt} = 6.60193 + \sqrt{\frac{50}{2.627}} = 14.3216 [V] \quad (7)$$

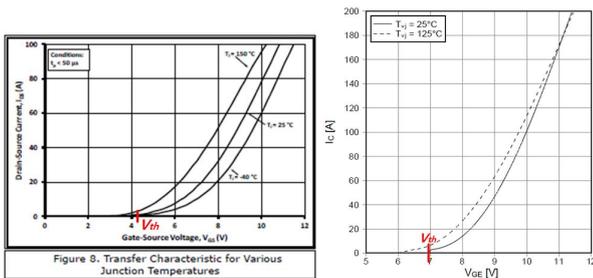


그림 4 50A SiC, 100A Si스위치 소자 datasheet의 I-V 곡선과 Vgs 파형

Fig. 4 I-V curve and Vgs wave of each switch elements in datasheet

따라서 위와 식 (2)와 (3)의 방법으로 각각의 문턱전압과 밀러플레토 전압을 구하였을 때 스위치 소자의 datasheet에 있는 각 전압 값으로 나오는 것을 확인하였다.

2.4 스위칭 시간 분석

이때 $C_{gs} + C_{gd} = C_{iss}$ 와 $V_{gs} = V_{GS}(1 - e^{-\frac{t}{R_g \cdot C_{iss}}})$ 의 식을 이용하여 그림 1에서의 각 구간에서의 시간을 구할 수 있다. 이를 이용하여 시간에 관한 식을 나타내면 다음과 같다.

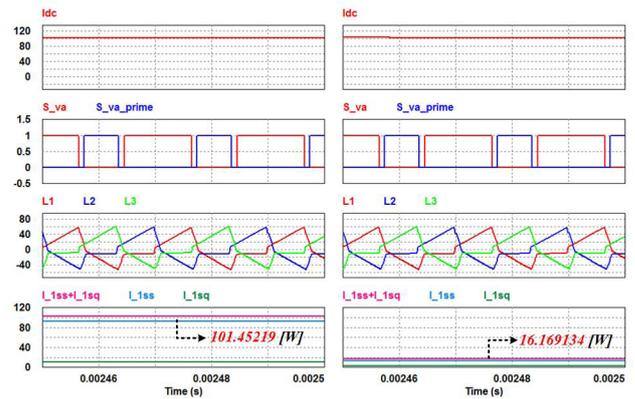
$$t_1 = R_g \cdot C_{ISS} \cdot \ln\left(\frac{V_{GS}}{V_{GS} - V_{th}}\right) \quad (8)$$

$$t_2 = R_g \cdot C_{ISS} \cdot \ln\left(\frac{V_{GS} - V_{th}}{V_{GS} - V_{pt}}\right) \quad (9)$$

$$t_3 = R_g \cdot C_{gd} \cdot \frac{V_{DS}}{V_{GS} - V_{pt}} \quad (10)$$

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 결과



(a) 100A Si 스위치소자 (b) 50A SiC 스위치 소자

그림 5. 50A SiC 및 100A Si 소자의 비교 시뮬레이션

Fig. 5. Comparison of between 50A SiC and 100A Si devices simulation

마지막 과정에서 스위치의 스위칭 손실과 도통 손실을 보았을 때 Si기반 스위치 소자의 경우 손실이 약 101.45[W] 발생하였고 SiC기반 스위치 소자의 경우 손실이 약 16.17[w] 발생하였다. 따라서 SiC기반 스위치 소자를 사용했을 때 손실이 매우 감소하는 것을 볼 수 있었다.

3. 결 론

스위치 소자는 Si 기반 스위치 소자보다 SiC 기반 스위치 소자를 사용했을 때 스위칭 손실이 약 85[W] 적게, 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 SiC 기반 스위치 소자를 사용하면 약 6배 효율을 높일 수 있다.

본 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20152020105720)

참 고 문 헌

- [1] Jin Hong Kim, A Study on Switching Loss Reduction for High Voltage MW Converter using Active Gate Driving M, pp. 9-23
- [2] Jong mu Lee, The Switching losses estimation of MOSFET for optimized low voltage inverter design. pp 21-33