

배터리 팩 시험기용 3상 AC/DC 컨버터에서의 SiC 및 Si 소자에 대한 손실 비교 분석

박세희, 현승욱, 성호재, 원충연
성균관 대학교

Comparison Analysis of SiC and Si Loss in 3-Phase AC/DC Converter for Battery Pack Testing System

Sae Hee Park, Seung Wook Hyun, Ho Jae Seong, Chung Yuen Won
SungKyunKwan University

ABSTRACT

This paper analyzes switching losses and efficiency depending on SiC and Si devices applied in 3 phase AC/DC Converter for Battery Pack Testing System. The switch elements of the 3 phase AC/DC Converter is compared to Si and SiC based elements and analyzed through comparison of each switching loss by simulation results.

1. 서론

최근 각광받고 전력 반도체 소자인 SiC 기반 소자는 넓은 밴드갭으로 인해 높은 전압 특성에 유리하고 또한, 높은 열전도도로 냉각시스템을 간단화시킬 수 있어 전체적인 시스템의 소형화가 가능하다. 또한 높은 절연과피전계 전계강도를 가지는 유리한 장점으로 적은 동작 손실을 갖게 된다. 이와 같은 장점으로 높은 문턱전압과 적은 손실을 가지며 고온에서 사용 가능하며 전체적인 시스템의 소형화가 가능해진다.

본 논문은 동일한 스위칭 주파수에서 문턱전압에 따른 SiC 기반 소자와 Si 기반 소자의 손실을 비교한 후 분석한다.

2. 3상 AC/DC 컨버터

1.1 3상 AC/DC 컨버터

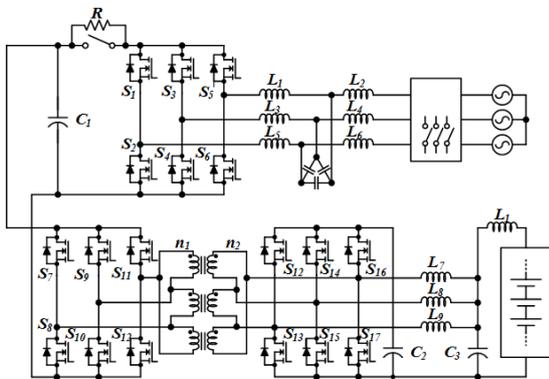


그림 1. 배터리 팩 시험기용 전력변환장치 회로도

Fig. 1. Power Converter Schematic of Battery pack Testing System

그림 1.은 Si 및 SiC 기반 소자의 손실을 비교하기 위한

3상 AC/DC PWM 컨버터의 회로도를 나타낸 것이다. 앞단의 AC/DC PWM 컨버터는 계통 전압을 700V로 승압시키기 위한 부스트 컨버터를 사용하였다. 뒷단의 3상 양방향 풀브릿지 컨버터는 소자에 흐르는 전류의 RMS 값을 낮추고 변압기 및 인덕터의 사이즈 감소를 위한 인터리브드 형태로 구성하였다.

1.2.1 Si 및 SiC의 스위칭 손실 분석

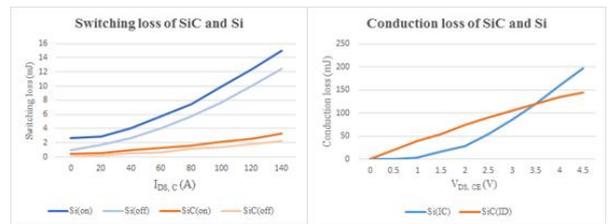


그림 2. SiC 및 Si 소자의 스위칭 손실, 도통 손실

Fig. 2. Switching loss and conduction loss of SiC and Si devices

그림 2는 비슷한 정격을 가지는 두 Si과 SiC 소자를 비교한 것이며 두 소자의 도통손실은 비슷한 것을 볼 수 있으나 스위칭 손실은 SiC가 Si보다 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서 기존 Si기반 스위치 소자에서 SiC기반 스위치 소자로 바꿈으로써 저감되는 손실을 비교·분석하였다.

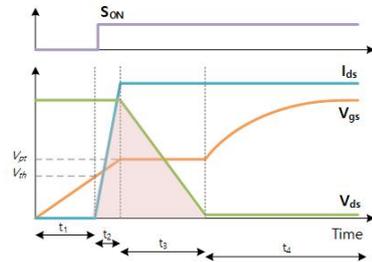


그림 3. 스위치 소자의 턴-온 특성파형

Fig. 3. Turn-on Characteristic Waveform of Switch device

그림 3은 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_{pl} 에 도달하면 V_{ds} 은 하강하기 시작한다. 이때 전압-전류 교차영역이 스위치 손실영역이 된다. 따라서 스위치 손실은 V_{th} 과 V_{pl} , 그리고 시간 t_3 의 영향을 받게 된다.

1.2.1 스위치 소자 내부 등가회로 분석

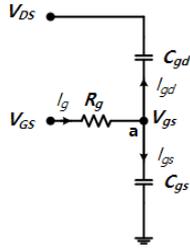


그림 4. 스위치 소자 내부 등가회로
Fig. 4. Internal equivalent circuit of Switch device

그림 4에서 Node a를 기준으로 I_g 에 관한 식으로 정리하였을 때 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 $I_g = \frac{V_{GS} - V_{gs}}{R_g}$ 의 식을 대입하여 전압과 시간에 관한 식으로 정리하면 식 (2)와 같이 정리되게 된다. 따라서 식 (2)를 기반으로 시간 t 에 관한 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$I_g = (C_{gs} + C_{gd}) \cdot \frac{dV_{gs}}{dt} \quad (1)$$

따라서 식 (1)에 $I_g = \frac{V_{GS} - V_{gs}}{R_g}$ 을 대입하여 풀고 이때 $C_{gs} + C_{gd} = C_{iss}$ 이므로 식 (2)와 같이 정리된다.

$$V_{gs} = V_{GS} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_g \cdot C_{iss}}}\right) \quad (2)$$

$$t = R_g \cdot C_{iss} \cdot \ln\left(\frac{V_{GS}}{V_{GS} - V_{gs}}\right) \quad (3)$$

따라서 시간 t 에 관한 식으로 그림 3에서의 각각의 구간에 서 시간에 관한 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_1 = R_g \cdot C_{ISS} \cdot \ln\left(\frac{V_{GS}}{V_{GS} - V_{th}}\right) \quad (4)$$

$$t_2 = R_g \cdot C_{ISS} \cdot \ln\left(\frac{V_{GS} - V_{th}}{V_{GS} - V_{pt}}\right) \quad (5)$$

$$t_3 = R_g \cdot C_{gd} \cdot \frac{V_{DS}}{V_{GS} - V_{pt}} \quad (6)$$

1.2.3 스위치 소자의 $I_{d,sat} - V_{gs}$ Curve 분석

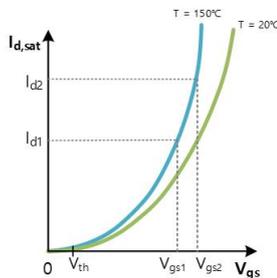


그림 5. 스위치 소자 $I_{d,sat} - V_{gs}$ Curve
Fig. 5. $I_{d,sat} - V_{gs}$ Curve of Switch device

그림 5를 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.

$$I_d = A(V_{gs} - V_{th})^2 \quad (7)$$

따라서 위 식을 바탕으로 I_d 에 관한 식으로 정리하면 식 (7)로 정리가 된다. 이때 임의의 두 점 (V_{gs1}, I_{d1}) , (V_{gs2}, I_{d2}) 을 잡아 식 (7)에 대입하여 문턱전압(V_{th})에 관한 식으로 정리하면 식 (8)로 나타낼 수 있다.

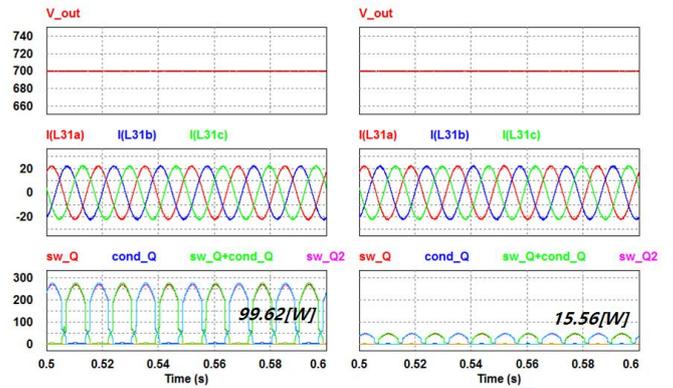
$$V_{th} = \frac{V_{gs1} \cdot \sqrt{I_{d2}} - V_{gs2} \cdot \sqrt{I_{d1}}}{\sqrt{I_{d2}} - \sqrt{I_{d1}}} \quad (8)$$

또한 Full 부하에서 전류가 포화 되었을 때 영역인 Milier Plateau 영역의 전압에 관한 식을 위와 같은 방법으로 정리하였을 때 식 (9)와 같이 정리된다.

$$V_{pt} = V_{th} + \sqrt{\frac{I_{fl}}{A}} \quad (9)$$

따라서 식 (2), (3), (4)을 통해 문턱전압이 커지면 Milier Plateau 전압도 커지게 되고 따라서 시간 t_3 에도 영향을 준다.

1.3 3상 AC/DC 컨버터 시뮬레이션



(a) Si 소자 스위치 파형 (b) SiC 소자 스위치 파형

그림 6. 스위치 소자 시뮬레이션
Fig. 6. Simulation of Switch device

이때 Si기반 스위치 소자의 스위치 손실은 약 99.62[W] 발생하였고 SiC기반 스위치 소자의 경우 약 15.56[W] 발생하였다.

3. 결 론

스위치 소자는 Si 기반 스위치 소자보다 SiC 기반 스위치 소자를 사용했을 때 스위칭 손실이 약 84.1[W] 적게 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 SiC 기반 스위치 소자를 사용하면 약 6.4배 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