

철도차량 전동기 드라이브 효율 증대를 위한 SiC 전력용 반도체 기반의 2레벨 3상 인버터의 손실 특성 비교

Comparison of Loss Characteristics of 2-Level 3-Phase Inverter based on SiC Power Semiconductor to Increase Driving Efficiency of Electric Motors in Railway Vehicles

저자 (Authors)	최태희, 이현재, 김길동, 이건복, 손진근 Tae-hee Choi, Hyun-jae Lee, Gil-dong Kim, Gun-bok Lee, Jin-Geun Shon
출처 (Source)	전기학회논문지 P 70P(4) , 2021.12, 187-193 (7 pages) THE TRANSACTION OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS P 70P(4) , 2021.12, 187-193 (7 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10671743
APA Style	최태희, 이현재, 김길동, 이건복, 손진근 (2021). 철도차량 전동기 드라이브 효율 증대를 위한 SiC 전력용 반도체 기반의 2레벨 3상 인버터의 손실 특성 비교. 전기학회논문지 P, 70P(4), 187-193.
이용정보 (Accessed)	가천대학교 210.102.***.52 2021/12/21 17:20 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Comparison of Loss Characteristics of 2-Level 3-Phase Inverter based on SiC Power Semiconductor to Increase Driving Efficiency of Electric Motors in Railway Vehicles

철도차량 전동기 드라이브 효율 증대를 위한 SiC 전력용 반도체 기반의
2레벨 3상 인버터의 손실 특성 비교

Tae-hee Choi · Hyun-jae Lee · Gil-dong Kim · Gun-bok Lee · Jin-Geun Shon†

최태희* · 이현재* · 김길동** · 이건복** · 손진근†

Abstract

The purpose of this paper is to compare and analyze the loss of propulsion inverter using SiC and Si power semiconductors for high efficiency of railway vehicles with renewable energy. Accordingly, loss comparison and analysis were carried out through PSIM Thermal Module and Loss Modeling with a SiC-MOSFET module and Si-IGBT Module. As a result, 2-level 3phase inverter using SiC-MOSFET module had extremely low switching loss compared to propulsion inverter that using Si-IGBT module. If SiC-MOSFET module is used in propulsion inverter of traction motor for railway vehicles, it is considered to be advantageous for high efficiency.

Key Words

Propulsion Inverter, Power Conversion Efficiency, Railway Vehicle, Traction Motor, Silicon Carbide Power Semiconductor, Silicon Power Semiconductor, SiC-MOSFET, Si-IGBT

1. 서 론

화석연료를 대체하는 친환경적 신재생 에너지 개발에 관한 연구개발의 증가로 인하여 철도 교통 시스템 분야에서도 친환경적 청정 추진 시스템에 관한 연구가 증가하고 있다. 철도 분야에서 또한, 에너지 Saving이 중요한 문제 중 하나로 대두되고 있으며, 대학연구실 또는 기업을 중심으로 대용량 시스템으로 설계 및 제어기술 연구가 활발히 진행 중이며, 그중에는 철도 차량용 견인전동기의 고효율화, 소형화 및 최적화 기술연구가 활발하게 진행 중이다.

국내에서는 1990년도 후반부터 운행되는 전동차의 인버터에 Si(실리콘) 기반의 Si-IGBT 모듈을 사용해왔다. 하지만 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 친환경 신재생 에너지를 사용하는 전동기를 제작하기 위해서는 철도 차량용 견인전동기의 고효율화, 소형화 및 주변기기의 최적화 기술연구가 필수이며, 차량

자체의 무게 절감이 또한 요구된다.

고속철도 기술의 안정화의 중요성이 커짐에 따라, 고속철도의 추진 전동기 구동을 위한 저주파 인버터를 대체하기 위하여 SiC(실리콘 카바이드)와 같은 WBG(Wide Band Gap)를 이용한 전력용 반도체가 적용된 전력 밀도가 뛰어난 고주파 인버터의 연구개발이 진행되고 있다[1,2]. 추진 인버터의 스위칭 주파수를 올리게 되면 주변 수동 소자들의 크기가 감소하며, 동 주파수로 운전시 대비 스위칭 손실로 인한 열 손실 또한 감소하여 보다 작은 방열 시스템의 탑재 또한 가능하다. 앞선 효과들을 이용하면 철도 차량의 추진 인버터 시스템의 크기를 감소할 수 있게 된다[3,4]. 따라서, 본 연구에서는 철도 차량의 효율증대를 위한 전동기 추진용 2레벨 3상 인버터의 스위칭 소자를 Si 전력용 반도체(Si-IGBT 모듈)와 SiC 전력용 반도체(SiC-MOSFET 모듈)로 그림 1과 같은 토폴로지를 통하여 스위칭 반도체 모듈에서 발생하는 각종 전력손실의 비교 및 분석한다. 이를 통해 SiC 전력용 반도체 모듈을 이용하였을 때의 전동기 추진 인버터의 고효율화 및 소형, 경량화의 가능성을 입증하고자 한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.

E-mail: shon@gachon.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0001-8357-4437>

*Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.

**Korea Railroad Research Institute, Korea.

Received : Jul. 30, 2021 Revised : Aug. 30, 2021 Accepted : Oct. 06, 2021

© The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

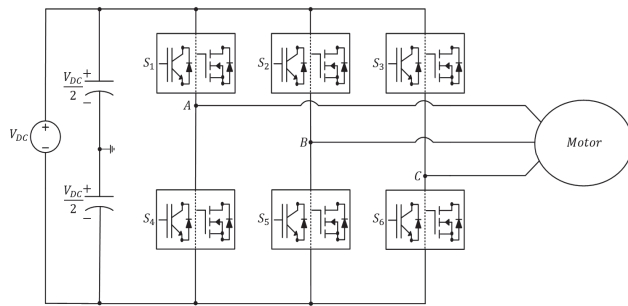


그림 1. 2레벨 3상 인버터 토폴로지와 연결된 견인전동기 추진 인버터의 전력회로도
Fig 1. Power circuit of traction motor propulsion inverter connected with 2-level
3- Phase Inverter Topology

2. 추진 인버터에서의 전력손실 분석을 위한 스위치 전류의 이론적인 모델링을 통한 해석

손실의 모델링을 위해서는 인버터에서 흐르는 스위치 전류의 이론적인 해석이 선행적으로 필요하다. 일반적인 인버터의 스위치 전류는 복잡한 양상을 나타내지만, 인버터의 출력단 전압 및 부하 전류에 따라서 분류할 수 있다. 인버터의 출력 전류에 영향을 주는 요인은 부하에 의한 영향과 인버터의 변조 기법에 따른 영향으로 나뉜다. 인버터의 출력 부하에 의하여 받는 영향으로는 인버터의 부하의 종류 및 역률을 생각할 수 있고, 인버터의 변조 기법에 따른 영향은 인버터의 변조 방식과 변조 방식에서 사용되는 주파수 변조지수 M_f 의 크기 및 진폭 변조지수 M_a 등 여러 가지 요인이 고려된다. 그 중 듀티비 D 는 인버터의 전류해석에 직접적으로 필요하다. 본 논문에서는 지령 정현파와 삼각 반송파를 비교하여 전압을 제어하는 기법인 SPWM(Sinusoidal PWM)기법을 사용하였다.

레그의 상위 단에 존재하는 전력용 반도체 모듈을 기준으로 만약 지령 전압 V_{ref} 값이 반송파 $V_{Carrier}$ 값보다 크게 될 때 스위치가 ON되어 트랜지스터 부분에 전류가 도통하게 되며 역병렬 다이오드에는 전류가 흐르지 않는다. 반대로 지령 전압 V_{ref} 값이 $V_{Carrier}$ 값보다 작게 될 때 트랜지스터는 OFF 되고 전류는 역병렬 다이오드로 흐르게 된다. 즉 전체 스위칭 주기 대비 스위치가 ON 되어 있는 비율을 의미하는 듀티비 D 를 이용하여 스위치 소자에 흐르는 전류를 추정해 낼 수 있다. 이는 그림 2를 보면 알 수 있다. 그림 2는 지령 전압 V_{ref} 와 반송파 $V_{Carrier}$ 의 파형을 나타낸 그림이며, 아래와 같은 식(2.1)에 의하여 듀티비 D 를 알아낼 수 있다.

$$D = \frac{T_{ON}}{T_s} = \frac{V_{ref} + V_c}{2V_c} = \frac{1}{2} \cdot [1 + M \sin(\omega t + \Phi)] \quad (2.1)$$

T_{ON} : On 시간 T_s : 전체 스위칭 주기

M : 진폭 변조비

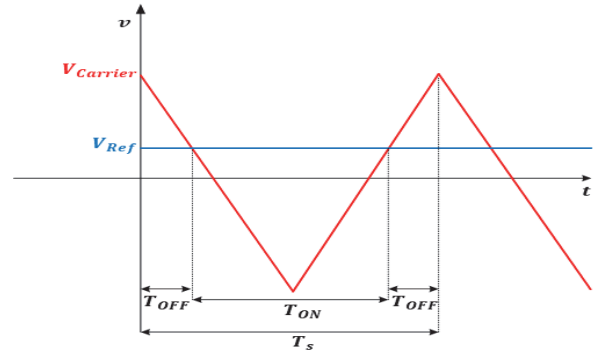


그림 2. 변조 과정에서의 삼각 반송파와 상전압 지령의 파형
Fig 2. Curves of the Carrier and Reference Phase Voltage Signal in Modulation

2레벨 3상 인버터의 경우 한 레그에는 상단 전력용 반도체 모듈과 하단 전력용 반도체 모듈 2개의 전력용 반도체 모듈들이 존재하며, 전동기 부하는 지상 부하이므로 한 주기동안 부하 전류는 부하전압과 극성에 따라 4구간으로 나뉘어 각 소자에 전류를 흘리게 된다[5]. 따라서, 전력용 반도체 모듈 한 개에 흐르고 있는 전류의 한 주기의 평균값 및 실효 값을 반주기만을 이용하여 1개의 전력용 반도체 모듈에서 발생하는 손실을 모델링 할 수 있게 된다.

2.1 추진 인버터에서의 전력용 트랜지스터로 흐르는 스위치 전류의 모델링

앞에서 서술한 듀티비를 이용하여 전류해석을 하였을 때 가장 먼저 전력용 트랜지스터로 흐르는 전류 값의 경우 전원에서 부하로 전류가 흐르는 상 부하 전류의 양의 반 주기만을 고려하여 계산하면 정현파 주기에 따라 파생된 식은 다음과 같이 식 (2.2)와 식 (2.3)으로 개별적인 전력용 트랜지스터 도통 평균 전류 값과 rms 전류 값을 나타낼 수 있다.

$$I_{Tr(avg)} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \left(1 + \frac{\pi \cdot M \cdot \cos \phi}{4}\right) \quad (2.2)$$

$$I_{Tr(rms)} = \frac{I_{rms}}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{8M \cdot \cos \phi}{3\pi}} \quad (2.3)$$

I_{Tr} : 트랜지스터 전류 M : 진폭 변조비

$\cos \phi$: 역률

2.2 추진 인버터에서의 다이오드로 흐르는 스위치 전류의 모델링

전력용 트랜지스터를 통하여 흐르는 전류의 평균값과 rms 값을 구할 때 부하 전류의 양의 반주기에 대하여 고려 하였으므로 다이오드의 흐르는 전류의 경우 전력용 트랜지스터가 도통된 시간 외에 도통되므로 앞선 식 (2.1)과 유사하게 식 (2.4)로 표현될 수 있다.

$$i_D = (1-D) \cdot i_o = (1-D) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{rms} \cdot \sin \omega t \quad (2.4)$$

i_D : 다이오드 전류 i_o : 인버터출력전류

식(2.4)를 이용하여 다이오드로 도통되는 평균 전류값 과 rms 전류 값을 구하면 식 (2.5) 와 (2.6)으로 다이오드에 흐르는 평균 전류와 rms 전류를 표현할 수 있다.

$$I_{D(avg)} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot M \cdot \cos \phi}{4}\right) \quad (2.5)$$

$$I_{D(rms)} = \frac{I_{rms}}{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{8M \cdot \cos \phi}{3\pi}} \quad (2.6)$$

I_D : 다이오드 전류 $\cos \phi$: 역률

3. 전력용 반도체 모듈의 손실 모델링을 이용한 도통 손실과 스위칭 손실 분석

전력용 반도체 모듈에서 발생하는 손실은 스위칭 손실, 도통 손실, 기생 커패시터에 의한 손실, 차단 손실 등 다양하게 존재하지만 본 논문에서 비교, 분석할 손실은 크게 스위칭 손실과 도통 손실 두 가지다. 도통 손실과 스위칭 손실이라는 두 가지의 손실 요소가 전력 반도체 소자에서 발생하는 손실 중 가장 지배적이며, 그림 3은 스위칭 손실과 도통 손실을 그래프를 통하여 시각화 한 것이다. t_{on} 은 스위치 On시간, t_{off} 는 스위치 Off시간을 의미하며, T 는 도통 시간을 의미한다.

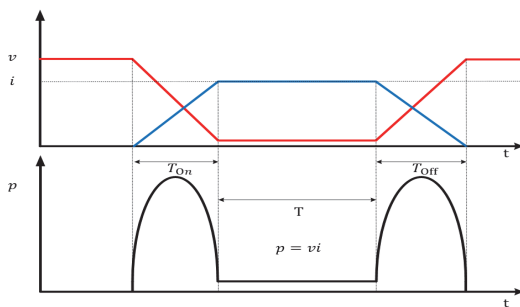


그림 3. 스위칭 On, Off시의 전압, 전류, 전력 파형

Fig 3. Voltage, current, and power waveforms during switching On and Off

1개의 전력용 반도체 모듈에서 발생하는 총 손실을 $P_{PowerSemi}$ 라고 할 때 $P_{PowerSemi}$ 는 스위칭 손실과 도통 손실의 합이며, 이는 식(3.1)로 표현할 수 있다. 전동기 추진 인버터의 경우 2 레벨 3상 인버터를 사용하는데 1개의 인버터에 6개의 전력용 반도체 모듈이 사용되고, 2레벨 3상 인버터의 경우 전류가 상보 대칭적으로 동작하므로 모든 전력용 반도체 모듈에서 발생하는 손실량은 같다. 따라서, 1개의 전력용 반도체 모듈의 총 손실량의 6배가 추진 인버터에서 사용되는 모든 전력용 반도체 모듈의 총 손실이 된다. 이는 식 (3.2) 로 표현할 수 있다.

$$P_{PowerSemi} = P_{Conduction} + P_{Switching} \quad (3.1)$$

$$P_{Inverter} = 6 \cdot P_{PowerSemi} \quad (3.2)$$

3.1 추진 인버터의 전력용 반도체 도통 손실

도통 손실은 스위칭 소자가 도통 상태일 때 소자에 전류가 흐르면서 발생하는 전압 및 전류 또는 내부저항 $R_{(on)}$ 값에 의해 발생하게 되는 손실이며 평균적으로 계산할 수 있는 MOSFET과 IGBT 그리고 Diode 에서의 도통 손실 식은 다음과 같다.

$$P_{con(MOSFET)} = I_{D(rms)}^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (3.3)$$

$$P_{con(IGBT)} = V_{CE(sat)} \cdot I_{C(Avg)} \quad (3.4)$$

$$P_{con(Diode)} = V_{TH} \cdot I_{F(avg)} + I_{F(Rms)}^2 \cdot R_D \quad (3.5)$$

P_{con} : 도통손실

I_D : 드레인 전류

$R_{DS(on)}$: 도통저항

$V_{CE(sat)}$: 포화전압

R_D : 다이오드 내부저항

I_C : 컬렉터 전류

V_{TH} : 문턱전압

I_F : 다이오드 순방향전류

또한 식 (3.5)은 다음과 같은 식 (3.6) 으로도 쓸 수 있다.

$$P_{con(Diode)} = V_F \cdot I_{F(avg)} \quad (3.6)$$

P_{con} : 다이오드도통손실

V_F : 순방향 바이어스 전압

I_F : 다이오드 순방향전류

3.2 추진 인버터의 전력용 반도체 스위칭 손실분석

스위칭 손실은 전력 트랜지스터가 On-Off 상태로 바뀌며 발생하는 Turn-On, Turn-Off 손실과 다이오드에서 Turn off시 발생하는 역 회복(Reverse Recovery)손실로 구성되어 있다. 다이오드 또한 Turn-On 손실이 존재하나 Turn-on 손실의 경우 손실이 발생하는 시간이 ns정도로 매우 짧으므로 무시할 수 있을 정도이다[5]. 스위칭 On-Off 손실은 전압과 전류가 서로 교차하게 되면서 손실이 발생하게 되며, 역 회복손실은 역병렬 다이오드에 의하여 전류를 방출하여 발생하는 손실을 의미한다.

3.2.1 MOSFET의 스위칭 손실분석

MOSFET에서 발생하는 Turn-On, Turn-Off 손실의 경우 식 (3.7)과 (3.8) 로 나타내었으며 최종적인 MOSFET에서 발생하는 스위칭 손실은 (3.9) 와 같다.

$$P_{On(MOSFET)} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} V_{dc} \cdot I_{rms} \cdot (t_{ri} + t_{fv}) \cdot f_{sw} + Q_{rr} \cdot V_{dc} \quad (3.7)$$

$$P_{Off(MOSFET)} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} V_{dc} \cdot I_{rms} \cdot (t_{rv} + t_{fi}) \cdot f_{sw} \quad (3.8)$$

$$P_{Switching(MOSFET)} = P_{On(MOSFET)} + P_{Off(MOSFET)} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} P_{Switching(MOSFET)} : & \text{스위칭 손실} & f_{sw} : & \text{스위칭 주파수} \\ P_{On(MOSFET)} : & \text{Turn-On 손실} & P_{Off(MOSFET)} : & \text{Turn-Off 손실} \\ I_{rms} : & \text{인버터 출력 전류} & Q_{rr} : & \text{다이오드 역회복 전하량} \\ t_{ri} : & \text{전류 상승 시간} & t_{fv} : & \text{전압 하강 시간} \\ t_{fi} : & \text{전류 하강 시간} & t_{rv} : & \text{전압 상승 시간} \end{aligned}$$

식(3.7)의 MOSFET Turn-On시 발생하는 손실에서 2번째 항은 역병렬 다이오드에서 발생하는 역 회복 전류로 인해 발생하는 부분이다.

3.2.2 IGBT의 스위칭 손실분석

IGBT의 스위칭 손실에너지 E_{On} 과 E_{Off} 의 경우 일반적으로 스위칭 과정에서 발생하는 손실에너지가 데이터 시트에 명시되어 있으나 이 수치는 대부분 실제적인 인버터 운전과정에서 사용하는 수치와는 다소 다르다. 따라서, 데이터 시트에 있는 수치를 기준으로 원하는 인버터 운전 환경에서의 손실 에너지를 다음과 같이 추정하여 IGBT에서 발생하는 스위칭 손실을 식 (3.10)과 (3.11)로 추정해야 한다.

$$P_{On(IGBT)} = E_{On(ref)} \cdot \left(\frac{V_{dc}}{V_{ref}}\right)^{Kv} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} I_{rms}}{I_{ref}}\right)^{Ki} \cdot (1 + TC_{sw}(T_j - T_{ref}) \cdot f_{sw}) \quad (3.10)$$

$$P_{Off(IGBT)} = E_{Off(ref)} \cdot \left(\frac{V_{dc}}{V_{ref}}\right)^{Kv} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} I_{rms}}{I_{ref}}\right)^{Ki} \cdot (1 + TC_{sw}(T_j - T_{ref}) \cdot f_{sw}) \quad (3.11)$$

$$P_{Switching(IGBT)} = P_{On(IGBT)} + P_{Off(IGBT)} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} P_{On(IGBT)} : & \text{Turn-On 손실} & P_{Off(IGBT)} : & \text{Turn-Off 손실} \\ V_{ref} : & \text{데이터 시트 기준전압} & I_{ref} : & \text{데이터 시트 기준전류} \\ E_{On, Off(ref)} : & \text{데이터 시트 기준에너지} & T_{ref} : & \text{데이터 시트 기준접합온도} \\ Kv : & \text{전압 의존지수} & Ki : & \text{전류 의존지수} \\ TC_{sw} : & \text{스위칭 손실 온도계수} & T_j : & \text{현재 접합온도} \end{aligned}$$

Kv 와 Ki 는 각각 전압 의존성에 관한 지수, 전류 의존성에 관한 지수를 의미하며 IGBT에서는 Kv 는 1.2~1.4 Ki 는 1이며 TC_{sw} 는 0.003의 값이 권장된다. 이런 보완 식을 통하여 데이터 시트에 명시된 기준값에 대해 유연하게 손실에너지를 추정할 수 있다[6].

3.2.3 역병렬 Diode의 스위칭 손실분석

다이오드의 스위칭 손실은 앞서 서술했듯 주로 Turn-Off 과정에서 발생하는 역 회복손실에 의해 발생하게 된다. 다이오드가 순방향으로 도통 된 상태에서 역방향 바이어스로 변환되면서 역전압이 걸리는데, PN 접합의 소수 캐리어들의 이동으로 인한 전류가 흐르면서 손실이 발생한다. 다이오드 스위칭 손실의 경우도 IGBT 손실과 같이 데이터 시트에 명시된 기준수치

들을 이용하여 추정할 수 있으며 이는 식 (3.13)에 쓰여있다.

$$P_{rr(Diode)} = E_{rr(ref)} \cdot \left(\frac{V_{dc}}{V_{ref}}\right)^{Kv} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} I_{rms}}{I_{ref}}\right)^{Ki} \cdot (1 + TC_{sw}(T_j - T_{ref}) \cdot f_{sw}) \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} E_{rr} : & \text{다이오드 역회복 손실 에너지} & P_{rr(Diode)} : & \text{다이오드 역회복 손실} \\ V_{ref} : & \text{데이터 시트 기준전압} & I_{ref} : & \text{데이터 시트 기준전류} \\ Kv : & \text{전압 의존지수} & Ki : & \text{전류 의존지수} \\ TC_{sw} : & \text{스위칭 손실 온도계수} & T_j : & \text{현재 접합온도} \end{aligned}$$

다만 역병렬 다이오드의 경우 앞선 IGBT와는 다른 전압, 전류 의존 지수와 스위칭 손실 온도계수를 가진다. 다이오드에서 Kv 는 0.6의 값을 가지며 Ki 는 0.5~0.6의 값을 갖는다. 또한, 스위칭 손실 온도계수의 경우 0.005~0.006을 갖는다. 그러나 일부의 다이오드 소자에서는 역 회복 손실에너지인 E_{rr} 대신 다이오드 역 회복 충전 전하량 Q_{rr} 과 전류를 주는데 이런 경우에는 식 (3.14)가 대신 사용 되기도 하며 식(3.14)는 다음과 같이 표현된 다[6].

$$P_{rr} = \frac{1}{4} \cdot Q_{rr} \cdot V_{dc} \quad (3.14)$$

$$P_{rr} : \text{다이오드 역회복 손실} \quad Q_{rr} : \text{역회복 전하량}$$

3.3 손실의 수식적 모델링을 통한 전력손실 측정

손실 모델링을 위하여 사용된 소자들의 파라미터들은 표 1과 같다. 대부분의 데이터는 데이터 시트를 참조하였으며, 데이터 시트에 명시되어 있지 않는 일부 데이터들의 경우에는 계산을 통하여 도출하였다.

표 1. 손실 모델링을 위한 소자들의 파라미터 값

Table 1. Parameter Values of Elements for Loss Modeling

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{TH}	0.99[V]	t_r	33[ns]
Q_{rr}	7[uC]	t_f	14[ns]
$E_{Off(ref)}$	7[mJ]	$V_{ce(sat)}$	2.1[V]
$E_{On(ref)}$	8.1[mJ]	$R_{DS(On)}$	24.9[mΩ]
$E_{rr(ref)}$	3[mJ]	R_D	11.6[mΩ]
$V_{ref(IGBT)}$	600[V]	$V_{ref(MOSFET)}$	800[V]
$I_{ref(IGBT)}$	75[A]	$I_{ref(MOSFET)}$	50[A]
$T_{ref(IGBT)}$	125[°C]	$T_{ref(MOSFET)}$	25[°C]
V_F	0.94[V]	f_{sw}	10[kHz]

표 1의 나와있는 소자들의 전기적인 파라미터 값들과 앞서 서술한 손실 모델링식 (3.3)~(3.14)들을 이용하여 손실 모델링을 통해 손실 값을 구한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 손실 모델링을 이용하여 도출된 손실

Table 2. Loss derived using Loss Modeling

Parameter	Si-IGBT	SiC-MOSFET
Conduction Loss	82.58[W]	95.59[W]
Switching Loss	184.81[W]	22.60[W]
Total Loss	267.40[W]	118.19[W]

표 2를 보면 손실 모델링을 통하여 Si-IGBT 모듈의 경우 도통 손실이 82.58[W]이고, 스위칭 손실의 경우 184.81[W]로 도출되었다. SiC-MOSFET 모듈의 경우 도통 손실은 95.59[W]이고 스위칭 손실의 경우 22.60[W]로 도출되었다. 스위칭 손실의 경우 12.22[%]로 대폭 감소한 것을 확인할 수 있다. 전체 손실의 경우 44.19[%]로 감소한 것을 확인할 수 있다.

4. Thermal Module을 이용한 손실분석 모의실험

4.1 손실분석 모의실험 방법 및 파라미터

철도 차량 추진 인버터의 경우 일반적으로 1000[V] 이상의 고전압의 어플리케이션으로 이지만, Si-MOSFET 모듈의 경우 내전압이 상대적으로 SiC-MOSFET 모듈과 Si-IGBT 모듈에 비하여 낮기 때문에 본 논문에선 고려되지 않았으며, 상대적으로 내전압이 높은 SiC-MOSFET 모듈과 Si-IGBT 모듈을 분석하였다. 또한 모의실험에서 온도에 의한 영향을 배제하고 SiC-MOSFET 모듈과 Si-IGBT 모듈 간의 손실분석을 위하여 소자들의 접합 온도는 25[°C]로 고정하고 진행하였으며, SiC-MOSFET 모듈과 Si-IGBT 모듈을 사용한 철도 차량용 견인전동기 추진용 2레벨 3상 인버터 모의실험은 PSIM의 Thermal Module 기능을 사용하여 진행하였다. 모의실험을 위한 토폴로지의 파라미터는 표3과 같다.

표 3. 손실 비교분석을 위한 토폴로지 파라미터값

Table 3. Topology Parameter Values for Loss Comparison Analysis

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{dc}	1200[V]	f_{sw}	10[kHz]
R_m	4.28[Ω]	f_{motor}	100[Hz]
L_m	3[mH]	C_{Link}	3000[μF]
Motor rate	105[kW]	M_a	1

모의실험을 위한 소자선정은 모의실험에서의 비교, 분석을 위하여 정격전압 1200[V]와 정격 전류 100[A]라는 비슷한 정격 조건이 맞는 모듈들을 선정하였고, SiC-MOSFET 소자의 경우 CREE사의 C3M0021120K를 사용하였으며, 역병렬 다이오드로는 Microsemi사의 MSC050SDA120BCT SiC-schottky Diode를 사용하였다. Si-IGBT 모듈은 Microsemi사의 APTGT75TA120PG를 사용하였다. PSIM Thermal Module 모의실험 회로는 그림 4와 같다.

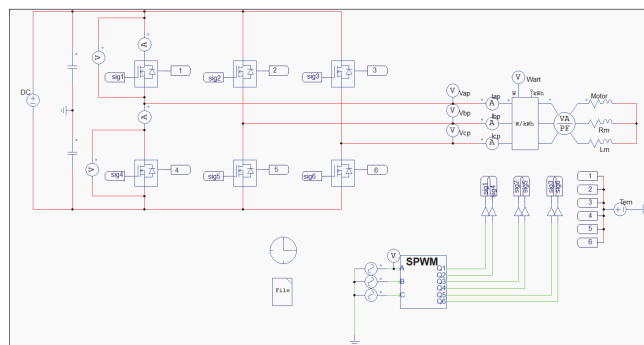


그림 4. 철도 차량 추진 인버터의 손실분석을 위한 PSIM모의실험 회로도

Fig. 4. PSIM Simulation Circuit for Loss Analysis of Propulsion Inverter for Railway Vehicles

4.2 손실분석 모의실험 결과

모의실험의 측정은 0.3[s]-0.35[s] 동안 인버터의 1개의 스위칭 모듈에서 발생하는 스위칭 손실 및 도통 손실의 평균값을 Thermal Module 기능을 이용하여 측정하였다. 그림 5는 전동기 인버터의 각 상전류를 측정된 파형이며, 약 127.8[A]로 측정되었다.

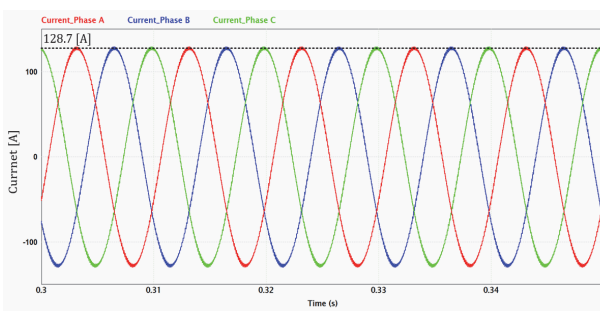


그림 5. 모의실험을 통하여 측정된 추진 인버터 출력 상전류 파형

Fig. 5. Propulsion Inverter Output Phase Current Waveform Measured through Simulation

Si-IGBT 모듈을 사용한 인버터의 도통 손실과 스위칭 손실 및 SiC-MOSFET 모듈을 사용한 인버터의 도통 손실과 스위칭 손실 파형을 그림 6과 7에서 확인 할 수 있다. 각각 a상 레그의 상단에 있는 스위칭 반도체 모듈의 손실을 측정하는 것이다.

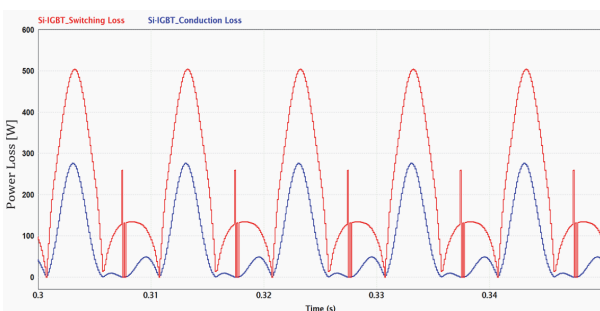


그림 6. 모의실험을 통하여 측정된 1개의 Si-IGBT 모듈에서 발생하는 도통 손실 및 스위칭 손실 파형

Fig. 6. Waveforms of Conduction Loss and Switching Loss Occurring In a Si-IGBT Module Measured through Simulation

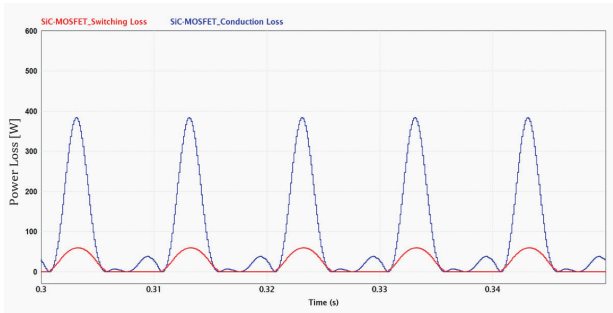


그림 7. 모의실험을 통하여 측정된 1개의 SiC-MOSFET 모듈에서 발생하는 도통 손실 및 스위칭 손실 파형

Fig. 7. Waveforms of Conduction Loss and Switching Loss Occurring In a SiC-MOSFET Module Measured through Simulation

모의실험에서 Si-IGBT모듈을 이용한 인버터에서 1개의 전력용 반도체 모듈에서 측정된 스위칭 손실과 도통 손실을 모두 합한 총 손실이 291.88[W]로 측정되었다. SiC-MOSFET 모듈의 경우 총 손실이 111.43W로 측정되었다. Si-IGBT 모듈을 사용하였을 때 대비 인버터에서 SiC-MOSFET 모듈을 사용하였을 때 총 손실은 38.17[%]로 감소하였다. 손실 모델링을 통하여 도출된 손실의 경우에는 총 손실은 Si-IGBT모듈의 경우 267.40[W]로 계산되었고, SiC-MOSFET 모듈의 경우 118.19[W]로 측정되었다. 계산 결과 인버터 총 손실이 42.20[%]로 감소하였다. 손실 모델링을 통한 방법과 모의실험을 통한 결과의 평균을 통하면 Si-IGBT 모듈에서 SiC-MOSFET 모듈로 전력용 반도체 모듈을 교체할 때 전체 손실은 41.18[%]감소했으며 이는 스위칭 손실이 매우 낮아졌기 때문이다. 두 방법을 사용한 손실 모델링에서 스위칭 손실은 Si-IGBT 모듈을 사용한 인버터 대비 SiC-MOSFET 모듈을 사용한 인버터가 10.38[%]로 스위칭 손실이 감소했다. 앞서 식 (3.1) 과 (3.2) 에서 서술했듯 2레벨 3상 인버터에서 전력용 반도체 모듈 6개가 사용되며 통상적으로 모두 같은 손실을 가지므로 1개의 스위칭 모듈의 손실의 6배가 인버터의 총손실이며 인버터의 총 손실을 정리한 결과가 표 4에 나와 있다.

표 4 손실 모델링을 통해 도출된 손실과 Thermal Module을 사용하여 도출된 인버터에서 발생하는 총 손실 정리표

Table 4. Loss derived from Loss Modeling and Total Loss Generated by Inverter derived using Thermal Module

Parameter	Calculation Using Loss Modeling		Simulation Using Thermal Module	
	Si IGBT	SiC MOSFET	Si IGBT	SiC MOSFET
Conduction Loss	495.48[W]	573.60[W]	473.82[W]	559.32[W]
Switching Loss	1108.86[W]	135.60[W]	1277.46[W]	109.26[W]
Total Loss	1604.4[W]	709.14[W]	1751.28[W]	668.58[W]

표 4를 보면, 도통 손실의 경우 SiC-MOSFET 모듈을 사용한 인버터가 Si-IGBT 모듈을 사용한 인버터보다 큰 것을 알 수 있는데 이는 선정된 소자의 도통 저항으로 인한 손실이 Si-IGBT

가 가진 포화 전압으로 인한 손실보다 크기 때문이며, 소자 간의 차이를 보이는 부분이라고 판단된다. 하지만 스위칭 손실의 경우 SiC-MOSFET 모듈을 사용한 인버터가 Si-IGBT 모듈을 사용한 인버터보다 손실 모델링을 사용하였을 때 12.22[%]로 감소하였으며 모의실험의 경우 8.55[%]로 감소하였음을 알 수 있다. 앞서 한 개의 소자에서 측정된 손실 감소비가 인버터 전체에서도 같음을 알 수가 있고 오차가 존재하나 SiC-MOSFET 모듈을 사용한 인버터의 경우 Si-IGBT 모듈을 사용한 인버터를 사용할 때 대비 추진 인버터에서 발생하는 총손실량의 감소와 매우 큰 폭의 스위칭 손실 감소를 알 수 있으며 이는 곧 2가지의 손실 추정 방법이 같은 추이를 따르는 것을 입증하였다.

4. 결론

본 논문은 철도 차량에서 전동기 드라이브 효율을 높이기 위하여 2레벨 3상 인버터에서 SiC-MOSFET 모듈과 Si-IGBT 모듈을 적용하였을 때의 손실을 비교분석 하였다. POWERSIM, Inc 에서 제공된 PSIM Thermal Module을 사용한 모의실험과 수식적 손실 모델링을 통한 손실 값의 비교 결과 SiC-MOSFET 모듈이 Si-IGBT 모듈과 비교하였을 때 3상 전동기 추진 인버터 토폴로지에서 총손실량이 약 41.18[%]감소된 것을 확인하여 상대적으로 우수함을 입증할 수 있었다. 따라서, 견인전동기 추진용 인버터에서 SiC-MOSFET 모듈을 사용하였을 때 Si-IGBT 모듈을 이용한 추진 인버터를 사용했을 때보다 상대적으로 고효율 및 고주파 운전이 가능하며, SiC-MOSFET 모듈을 이용하여 제작한 철도 차량 전동기 추진용 인버터가 신재생 에너지를 사용한 전기 철도 및 기존 철도의 고효율화 등의 많은 목표 달성에 직접적인 도움이 될 것이라고 판단된다.

References

- [1] Young-Jae Han, Su-Gil Lee, Chan-Kyoung Park, Young-Guk Kim, Chang-Han Bae, "The Trend Analysis of Propulsion System for Railway Vehicle Using Patent Analysis," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 19, no. 5, pp. 131-138, 2018.
- [2] Chan-Bae Park, Kwang Woo Joung, "Electric equipment trend for rail vehicle propulsion," THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, vol. 21, no. 4, pp. 27-34, 2016.
- [3] H. Zhang, L. M. Tolbert and B. Ozpineci, "Impact of SiC Devices on Hybrid Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 2, pp. 912-921, 2011.
- [4] H. Kogure, K. Ishikawa, Y. Kohnno, T. Sakai and T. Ishigaki, "Development of Low Loss Inverter System Adopted Lower Harmonic Losses Technology and Ultra Compact Inverters Adopted High Power Density SiC Module," 2018 20th European

Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), pp. 1-7, 2018.

- [5] Ho-chul Ji, Seung-gi Jeong, "A Study on the Analysis and Prediction of switch currents in PWM inverters," Master Thesis, KWANGWOON UNIVERSITY, 1997.11, Seoul
- [6] Guo, Jing, "Modeling and Design of Inverters using Novel Power Loss Calculation and DC-Link Current/Voltage Ripple Estimation Methods and Bus Bar Analysis," Ph.D Thesis, McMaster University, Canada. 2017.
- [7] SEMIKRON Application Note, "Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules," 2014.

Acknowledgments

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20194030202290) and was supported by a grant from R&D Program of the Korea Railroad Research Institute, Republic of Korea.

저자소개



최태희 (Tae-hee Choi)

He received his B.S. degree in Gachon University Gyeonggi-Do, Korea, currently he is pursuing his M.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.

E-mail : chlhogml96@gachon.ac.kr



이현재 (Hyun-Jae Lee)

He received his M.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea, currently he is pursuing his Ph. D. degree in Gachon University, Gyeonggi- Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.

E-mail : lhj501@gc.gachon.ac.kr



김길동 (Gil-dong Kim)

He received his B.S., M.S. and Ph. D, degrees in the Department of Electrical Engineering from Myongji University in 1986, 1991 and 2003. He is currently a Head Director at the Korea Railroad Research Institute(KRRI), Korea.

E-mail : gdkim@krri.re.kr



이건복 (Gun-bok Lee)

He received the B.S. degree in electrical and information communications engineering from Chungnam National University, Daejeon, Korea, in 2010, and Ph.D. degree in electrical engineering from the Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Korea, in 2016. He is currently an Senior Researcher with Propulsion System Research Department, Korea Railroad Research Institute (KRRI).

His research interests are wireless power transfer, EM energy harvesting, hydrogen-powered locomotive.

e-mail: gunbok@krri.re.kr



손진근 (Jin-Geun Shon)

He received his B.S., M.S. and Ph. D, degrees in the Department of Electrical Engineering from Soongsil University in 1990, 1992 and 1997. He was Chief Researcher in Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea, during 1992-1995. He was a Postdoctoral Researcher in the Department of Electrical and Electronic Engineering, Kagoshima University, from 2002 to 2003. He was also a Visiting Scholar in the Power Electronics Laboratory, Michigan State University, from 2009 to 2010. He is currently a Professor at the school of Electrical Engineering, Gachon University, Korea. His research interests are the power conversion, control and diagnosis of power utility.

E-mail : shon@gachon.ac.kr