

운행 프로파일 기반 도시철도차량용 반도체 변압기의 전력 반도체 소자 수명 평가

최의민¹, 박진혁², 김명룡², 이준석[†]

Operation-Profile Based Lifetime Evaluation of Power Semiconductor Devices in Solid-State Transformer for Urban Railway Vehicles

Ui-Min Choi¹, Jin-Hyuk Park², Myung-Yong Kim², and June-Seok Lee[†]

Abstract

The reliability of a solid-state transformer (SST) is one of the important aspects to consider when replacing a conventional low-frequency passive transformer with SST for urban railway vehicles. Lifetime evaluation of SST in the design phase is therefore essential in guaranteeing a certain SST reliability. In this study, a lifetime evaluation of power semiconductor devices in SST is performed with respect to temperature stress. For a case study, a 3 MW SST with three kinds of power modules (one IGBT module and two SiC-MOSFET modules) is used for the lifetime estimation under the operation profile of urban railway vehicles.

Key words: Railway vehicle, Solid-state transformer, Reliability, Lifetime, Power module

1. 서 론

차세대 철도차량은 더 빠른 속도, 더 높은 효율, 더 적은 중량과 부피를 목표로 하며 이를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다^[1].

그림 1(a)는 일반적인 철도차량의 추진시스템을 보여 준다. 저주파 변압기와 AC/DC 컨버터를 통해 25kV의 단상 교류 고전압을 직류전압으로 변환하여 DC/AC 추진 인버터에 공급한다. 교류 고전압을 교류 저전압으로 변환하기 위해 사용되는 저주파 변압기는 부피가 매우 크고 무거우며 효율 또한 높지 않다. 따라서 고효율 및 고전력밀도를 갖는 차세대 철도차량을 개발하기 위해 저주파 변압기 기반의 추진시스템을 그림 1(b)와 같이 반도체 변압기 기반의 추진시스템으로 대체하려는 연구가 활발히 진행 중이다^{[2],[3]}.

15kV, 16.7Hz의 변압기 기반의 추진시스템을 대체하

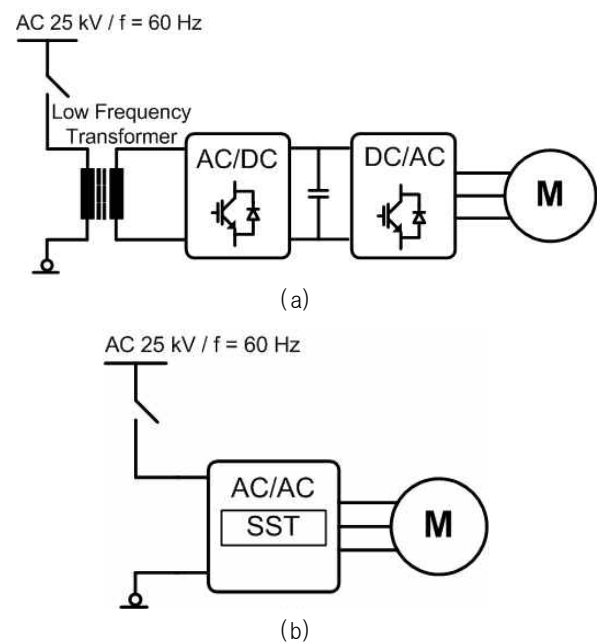


Fig. 1. Configuration of propulsion system. (a) Conventional propulsion system, (b) Solid state transformer based propulsion system.

고자 ALSTOM社は cascade 형태의 AC/DC 컨버터와 공진형 컨버터 기반의 1.5MW 반도체 변압기를 개발하였으며 ABB社は cascade 형태의 입력 측 AC/DC 컨

Paper number: TKPE-2020-25-6-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: ljs@dankook.ac.kr, School of Electronics and Electrical Eng., Dankook University
Tel: +82-2-8005-3628

¹ Dept. of Electronic & IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology

² Korea Railroad Research Institute

Manuscript received Oct. 13, 2020; accepted Oct. 22, 2020

버터와 LLC 공진형 DC/DC 컨버터 기반의 1.2MVA 반도체 변압기를 개발하였다^[4].

반도체 변압기는 일반적으로 저주파 변압기에 비해 부피, 무게, 및 효율 측면에서 우수한 성능을 보이는 반면, 가격과 신뢰성 측면에서는 저주파 변압기의 성능이 더 우수하다^[5]. 단 이러한 특성은 반도체 변압기의 응용 분야에 따라 달라질 수 있다. 따라서 반도체 변압기의 상용화를 위해서는 가격과 신뢰성 측면의 개선이 필요하다.

전력 반도체 소자는 전력변환장치를 구성하는 소자들 중 신뢰성 측면에서 가장 취약한 소자로 전력변환장치 뿐만 아니라 전체 시스템의 신뢰성에 중요한 역할을 한다^[6]. 반도체 변압기는 많은 수의 전력 반도체 소자들로 구성되어 있어 전력 반도체 소자의 수명을 고려한 반도체 변압기의 신뢰성 설계가 필요하다. 전력 반도체 소자의 열화 고장은 주로 bond-wire와 solder-joint에 발생하며 온도 스트레스가 주된 고장 원인이다^[7].

본 논문에서는 도시철도차량용 반도체 변압기에 사용되는 전력 반도체 소자의 수명을 평가한다. 수명 평가를 위해 약 85초 도시철도차량 운행 프로파일이 고려되며 3MW 반도체 변압기에 사용되는 Si 기반의 IGBT 모듈과 두 종류의 SiC-MOSFET 모듈의 수명이 온도 스트레스를 바탕으로 평가된다.

2. 도시철도차량용 반도체 변압기

그림 2는 도시철도차량용 반도체 변압기의 구성도를 보여준다. 반도체 변압기는 25kV의 교류 고전압을 직류 고전압으로 변환하는 AC-DC 컨버터와 직류 고전압을 직류 저전압으로 변환하는 절연형 DC-DC 컨버터로 구성된다. 25kV의 교류 고전압을 직류전압으로 변환해야 하므로 AC-DC 컨버터로는 12개의 H-bridge 컨버터가 직렬로 연결된 Cascaded H-bridge Multilevel(CHM) 컨버터가 사용된다^[8]. 각 H-bridge 컨버터는 고속 스위칭이 필요하지 않기 때문에 정격 6500V, 400A의 IGBT 모듈이 사용된다. 철도차량용 반도체 변압기에 사용되는 DC-DC 컨버터는 절연과 양방향 전력전달이 요구되므로 Dual Active Bridge(DAB) 컨버터가 사용된다^[9]. DAB 컨버터는 변압기 전압의 위상 차이를 통해 전력을 양방향으로 쉽게 전달할 수 있으며 소프트 스위칭으로 효율을 향상시킴으로써 전력밀도를 높일 수 있는 장점이 있다. DAB DC-DC 컨버터의 고압부 1차 측은 하프 브릿지로 구성되고 고주파 변압기의 크기를 줄이기 위해 고속 스위칭이 필요하므로 정격 3300V, 750A의 SiC-MOSFET 모듈이 사용된다. 저압부 2차 측은 풀 브릿지로 구성되고 정격 1200V, 800A의 SiC-MOSFET 모듈이 사용된다.

1개의 H-bridge 컨버터마다 직렬로 연결된 2개의 DAB DC-DC 컨버터가 연결되어 1개의 모듈을 구성하고

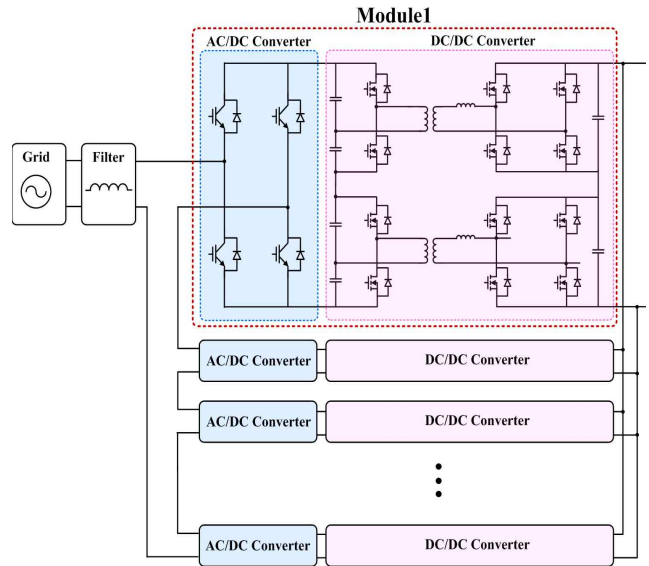


Fig. 2. Configuration of solid-state transformer used in urban railway vehicle.

TABLE I
POWER MODULES USED IN SOLID STATE TRANSFORMER

Converter	Device	Rated voltage / Rated current
AC-DC	FZ400R65KE3	6500 [V] / 400 [A]
DC-DC (Primary)	FMF750DC-66A	3300 [V] / 750 [A]
DC-DC (Secondary)	FMF800DX-24A	1200 [V] / 800 [A]

있으며 본 논문의 반도체 변압기는 총 12개의 모듈로 이루어진다. 반도체 변압기를 구성하는 각 모듈의 입력은 직렬로 연결되고 출력은 병렬로 연결된다. 반도체 변압기를 구성하는 전력 반도체 소자는 표 1과 같다.

3. 전력 반도체 소자의 수명 평가

3.1 수명 평가 방법

그림 3은 전력 반도체 소자의 수명을 평가하는 방법을 보여준다^[10]. 반도체 변압기에 사용되는 컨버터의 사양, 제어 방법 등과 같은 컨버터의 정보, 전력 반도체 소자의 특성 및 반도체 변압기 기반 도시철도차량의 운행 프로파일로부터 반도체 소자의 손실 프로파일을 얻는다. 반도체 소자의 열 모델을 이용하여 손실 프로파일을 온도 프로파일로 변환하고 주요 열 스트레스 요소인 정선 온도 변화(ΔT_j), 평균 정선 온도(T_{m}) 및 정선 온도 변화 시간(t_{on})을 낙수계수법(Rainflow counting method)을 이용하여 추출한다.

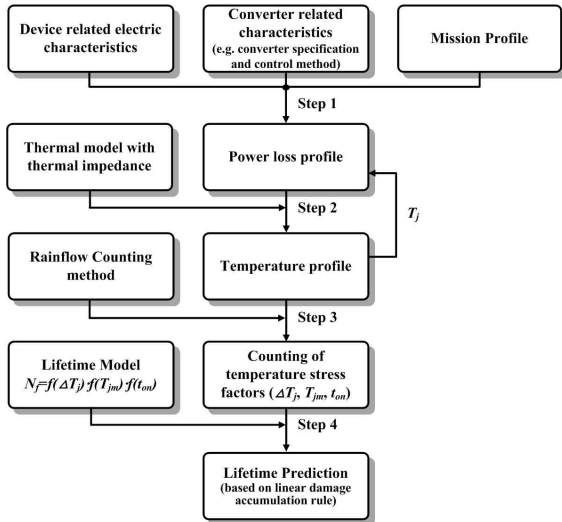


Fig. 3. Lifetime estimation procedure of power devices in power converter applications^[10].

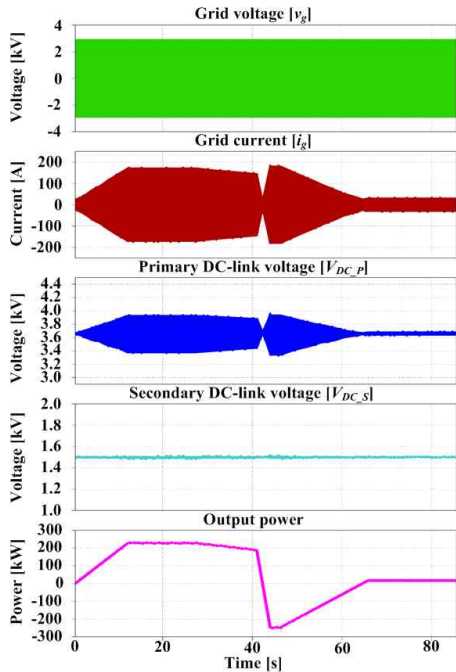


Fig. 4. Inputs and outputs of one module of SST under the mission profile.

마지막으로 추출된 열 스트레스 요소들을 전력 반도체 소자의 수명 모델에 적용하여 주어진 운행 프로파일 동안 축적된 전력 반도체 소자의 데미지를 계산하고 이를 바탕으로 수명을 예측한다.

본 논문에서는 약 85초 동안의 도시철도차량의 운행 프로파일을 바탕으로 반도체 변압기의 전력 반도체 소자들의 수명을 평가한다. 분석의 간략화를 위해 12개의 모듈로 구성된 정격 3MW 반도체 변압기를 250kW 정격을 갖는 1개의 모듈로 간략화하였으며 반도체 변압기의 부하는 도시철도차량의 운행 프로파일을 바탕으로 한 전류원으로 대체하였다.

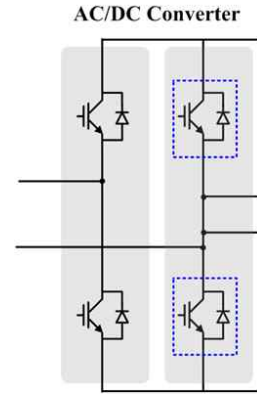


Fig. 5. AC/DC converter in one module of SST.

그림 4는 도시철도차량의 운행 프로파일에 따른 반도체 변압기 모듈의 입력과 출력을 보여준다. 12개의 AC-DC 컨버터가 직렬로 연결되어 있으므로 한 모듈의 계통전압은 약 2083V이며 DC-DC 컨버터의 1차 측, 2차 측 직류단 전압은 각각 3660V와 1500V로 제어되고 있다. 계통 전류 및 부하 전력 파형으로부터 약 40초까지 열차가 가속되며 40초 이후 열차가 감속하는 것을 알 수 있다.

3.2 전력 반도체 소자의 정선 온도 프로파일

그림 5는 반도체 변압기의 한 모듈을 구성하고 있는 AC-DC 컨버터를 보여준다. AC-DC 컨버터는 4개의 IGBT 모듈로 구성되어 있으며 한 레그를 구성하는 2개의 IGBT 모듈들이 하나의 방열판 위에 놓여있다.

전력 반도체 소자의 열적 임피던스는 일반적으로 Foster 모델을 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$Z_{th(j-c)}(t) = \sum_{i=1}^n R_i(1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (1)$$

여기서 $Z_{th(j-c)}$ 는 IGBT 혹은 다이오드의 정선과 IGBT 모듈 케이스 사이의 열적 임피던스, $\tau_i = R_i C_i$ 그리고 i 는 Foster 모델의 각 $R_i C_i$ 조합을 의미한다.

그림 6은 AC-DC 컨버터 IGBT 모듈의 열 등가 모델을 보여준다. IGBT와 다이오드의 정선 온도는 전력 반도체 소자의 열적 임피던스와 전력 손실로부터 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$T_j = P_{Device}(t) \cdot Z_{th(j-c)}(t) + P_{Module}(t) \cdot Z_{th(c-h)}(t) + T_h \quad (2)$$

여기서 T_j 는 IGBT 혹은 다이오드의 정선 온도, P_{Device} 는 IGBT 혹은 다이오드의 손실, $Z_{th(j-c)}$ 는 IGBT 혹은 다이오드의 정선과 IGBT 모듈 케이스 사이의 열적 임피던스, P_{Module} 은 IGBT 모듈 전체 손실, $Z_{th(c-h)}$ 는 IGBT 모듈 케이스와 방열판 사이의 열적 임피던스이며 T_h 는 방열판의 온도이다.

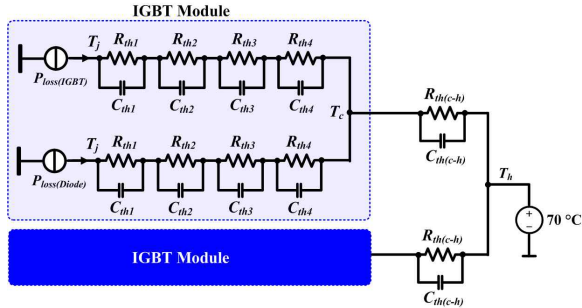


Fig. 6. Thermal equivalent block diagram of IGBT module in AC-DC converter.

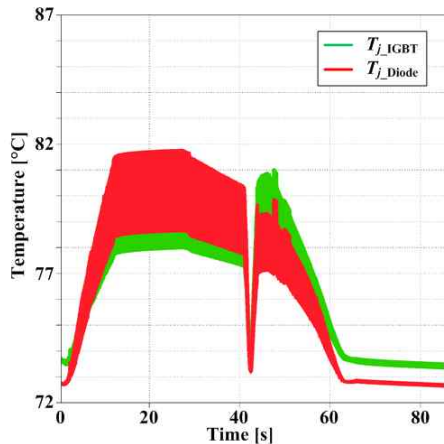


Fig. 7. Junction temperature profiles of power devices in AC-DC converter under the given operation profile.

본 논문에서는 방열판이 최대 온도 70°C로 유지되는 최악의 상황을 고려하였으며 열적 임피던스 파라미터값들은 각 모듈의 데이터 시트로부터 얻을 수 있다.

그림 7은 주어진 운영 프로파일 하에서 AC-DC 컨버터의 IGBT와 다이오드의 정선 온도 프로파일을 보여준다. 다이오드의 정선 온도는 열차 가속 구간에서 약 81.8°C 까지 상승하여 최대 약 9°C의 정선 온도 변화를 보이며 IGBT의 정선 온도는 열차 감속 구간에서 약 81°C로 증가하여 최대 약 7.5°C의 정선 온도 변화가 발생한다. AC-DC 컨버터에 사용되는 전력 반도체 소자의 정격 정선 온도는 125°C로 모두 정격 정선 온도 이내에서 동작한다.

그림 8은 반도체 변압기 한 모듈의 DAB DC-DC 컨버터를 보여준다. DAB DC-DC 컨버터의 1차 측은 1개의 하프 브릿지 SiC-MOSFET 모듈이 1개의 방열판에 설치되어 있다. 2차 측은 2개의 풀 브릿지 컨버터를 구성하기 위해 4개의 하프 브릿지 SiC-MOSFET 모듈이 사용되었으며 모두 1개의 방열판 위에 놓여있다. DAB DC-DC 컨버터에 사용되는 전력 반도체 소자의 정선 온도 또한 식 (2)로부터 얻을 수 있는데 이때 P_{Module} 은 하프 브릿지 SiC-MOSFET 모듈 전체의 손실 즉, 2개의 MOSFET과 2개의 다이오드의 손실을 고려해 주어야 한다.

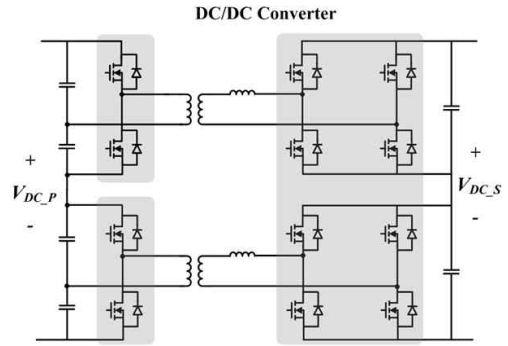


Fig. 8. DAB DC-DC converter in the one module of solid-state transformer.

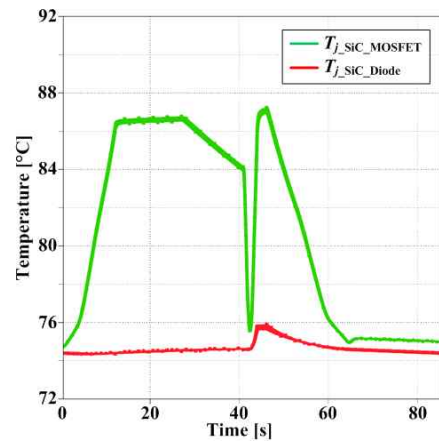


Fig. 9. Junction temperature profiles of primary side power devices in DAB DC-DC converter under the given operation profile.

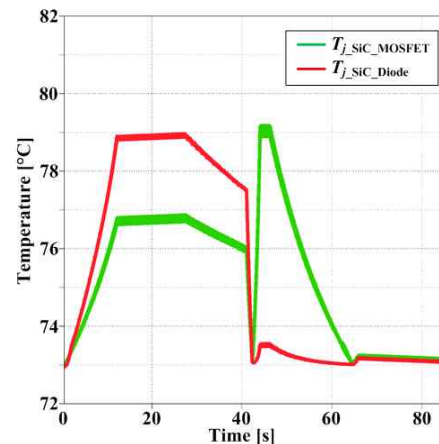


Fig. 10. Junction temperature profiles of secondary side power devices in DAB DC-DC converter under the given operation profile.

그림 9와 그림 10은 DAB DC-DC 컨버터의 1차 측과 2차 측에 사용되는 SiC-MOSFET과 SiC 다이오드의 정선 온도를 보여준다. 1차 측 하프 브릿지 컨버터의 경우 대부분의 손실이 SiC-MOSFET에서 발생한다. 정선 온도는 약 87°C로 증가하여 최대 약 13°C의 온도 변화가

발생하는 반면에 SiC 다이오드의 정선 온도 변화는 매우 미비하다. 2차 측의 SiC-MOSFET과 SiC 다이오드의 정선 온도의 경우 모두 약 6°C의 온도 변화를 보여 최대 약 79°C로 증가한다.

3.3 전력 반도체 소자의 수명예측

온도 스트레스에 관한 전력 반도체 소자의 수명 모델로부터 전력 반도체 소자의 수명을 평가하기 위해 정선 온도 프로파일로부터 온도 스트레스 요소들을 추출한다. 일반적으로 정선 온도 변화량(ΔT_j), 평균(혹은 최소 또는 최대) 정선 온도(T_{jm}) 그리고 정선 온도 변화시간(t_{on})이 고려되며 낙수계수법(Rainflow counting method)을 이용하여 온도 스트레스 요소들의 값을 얻는다^[11].

그림 11(a)와 (b)는 AC-DC 컨버터의 IGBT와 다이오드의 정선 온도 프로파일로부터 낙수계수법을 이용하여 추출한 정선 온도 변화와 평균 정선 온도를 보여준다. 추출된 온도 스트레스 요소값들을 IGBT 모듈의 수명 모델에 넣게 되면 특정 온도 스트레스 조합(ΔT_j , T_{jm} 그리고 t_{on}) 하에서의 수명 사이클 수(N_f)가 계산된다.

IGBT 모듈 혹은 SiC-MOSFET 모듈의 수명 모델은 다음과 같다^{[12],[13]}.

$$N_f = A \cdot (\Delta T_j)^{\beta_1} \cdot \exp\left(\frac{\beta_2}{(273 + T_{jm})}\right) \cdot (t_{on})^{\beta_3} \quad (3)$$

여기서 A , β_1 , β_2 그리고 β_3 는 상수로 해당 모듈의 파워 사이클링 테스트 결과로부터 얻을 수 있으며 IGBT 모듈의 수명 모델에서는 T_{jm} 값으로 정선 온도의 최솟값(T_{jmin})이 SiC-MOSFET 모듈의 수명 모델에서는 정선 온도의 최댓값(T_{jmax})이 각각 사용되었다. 이 값으로부터 한 주기 운행 프로파일 동안 IGBT 모듈 혹은 SiC-MOSFET 모듈에 축적된 데미지(Accumulated damage)를 얻을 수 있고 수명이 예측된다.

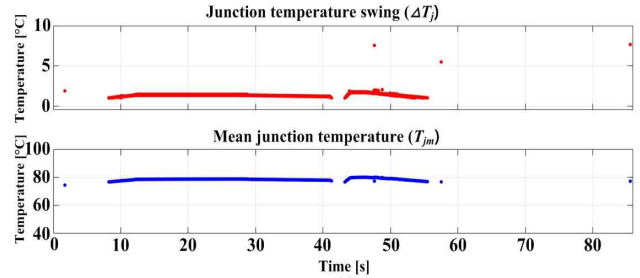
Palmgren-Miner's Rule에 의해 만약 k 개의 다른 크기의 스트레스가 있고 어떤 물질이 i 번째 스트레스에 특정한 횟수 n_i 동안 노출되었다면 그 스트레스에 의한 데미지(D)는 다음과 같다^[14].

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

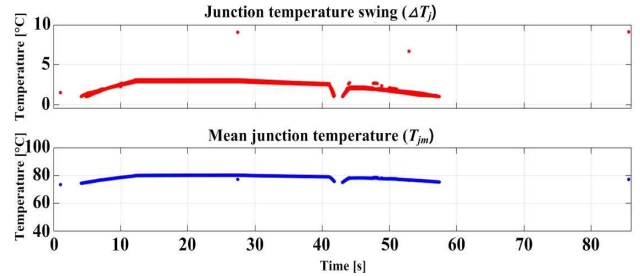
여기서 n_i 는 i 번째 스트레스가 인가된 횟수이고, N_i 는 i 번째 스트레스가 인가되었을 때 수명 사이클 수(N_f)로 수명 모델을 통해서 얻을 수 있다.

만약 k 개의 스트레스가 모두 같은 고장 메커니즘을 유발한다면 k 개의 스트레스에 의해 축적된 데미지(AD, Accumulated Damage)는 다음과 같다.

$$AD = \sum_{i=1}^k \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_{k-1}}{N_{k-1}} + \frac{n_k}{N_k} \quad (5)$$



(a)



(b)

Fig. 11. Junction temperature swing and mean junction temperature extracted from the junction temperature profiles by the Rainflow counting method. (a) IGBT, (b) Diode.

여기서 누적된 총 데미지가 1이 된다면 고장이 발생한 것으로 판단한다.

그림 12와 그림 13은 DC-DC 컨버터 1차 측과 2차 측 SiC-MOSFET과 SiC 다이오드의 정선 온도 프로파일로부터 낙수계수법을 이용하여 추출한 온도 스트레스 요소를 보여주며 1차 측 SiC 다이오드의 온도 변화는 매우 작아 수명 평가에서 제외되었다.

그림 14는 한 주기 운행 프로파일 동안 AC-DC 컨버터의 IGBT와 다이오드에 축적된 데미지를 보여준다. IGBT와 다이오드의 축적된 데미지는 각각 $2.2 \cdot 10^{-9}$, $5.4 \cdot 10^{-9}$ 으로 다이오드에 축적된 데미지가 더 큰 것을 알 수 있고 이는 그림 7의 정선 온도 프로파일에서 보듯이 다이오드 정선의 온도 변화가 IGBT 정선의 온도 변화보다 더 크기 때문이다. 한 주기 운행 프로파일 동안 전력 반도체 소자의 데미지는 표 2에 정리되어 있으며 AC-DC 컨버터의 다이오드에 축적된 데미지가 가장 큰 것을 알 수 있다.

전력 반도체 소자의 수명은 한 주기 동안의 축적된 데미지로부터 다음과 같이 계산된다.

$$Lifetime(day) = \frac{T_{profile}(s)}{T_{operation}(s) \times AD} \quad (6)$$

여기서 $T_{profile}$ 은 한 주기 운행 프로파일 시간, $T_{operation}$ 은 철도차량의 하루 운행시간이며 AD 는 한 주기 운행 프로파일 동안 누적된 데미지이다. 철도차량이 하루 12시간 운행한다는 가정하에 식 (6)과 표 2의 데미지로부터 계산된 각 소자의 수명은 모두 100년 이상이다.

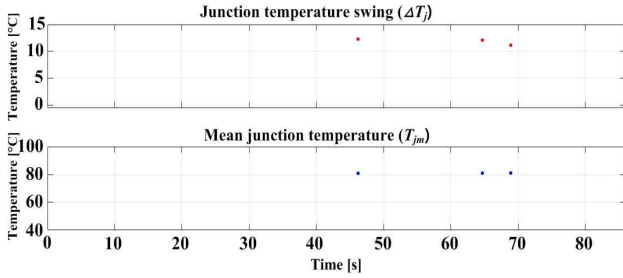


Fig. 12. Junction temperature swing and mean junction temperature extracted from the junction temperature profile of SiC-MOSFET in primary side of DAB converter.

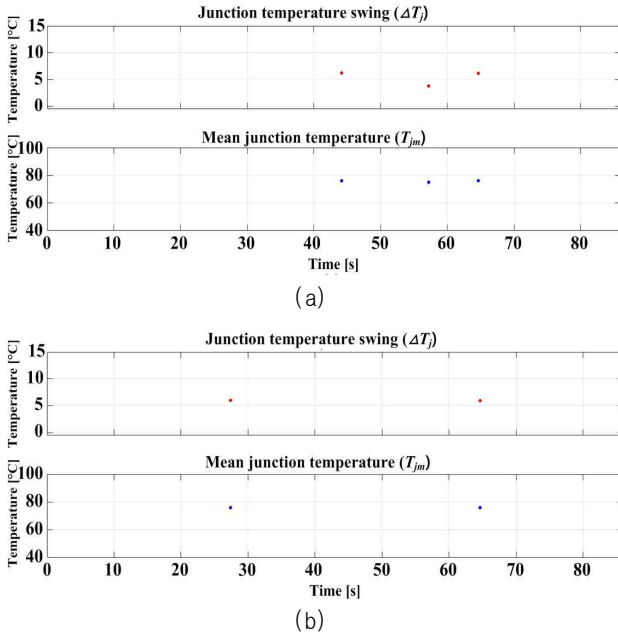


Fig. 13. Junction temperature swing and mean junction temperature extracted from the junction temperature profiles of power devices in secondary side of DAB converter. (a) SiC-MOSFET, (b) SiC diode.

4. 결 론

본 논문에서는 반도체 변압기의 신뢰성 평가를 위해 신뢰성 취약 소자 중 하나인 전력 반도체 소자의 수명을 철도차량의 운행 프로파일을 고려하여 평가하였다. 반도체 변압기를 구성하는 전력 반도체 소자 중 AC-DC 컨버터의 다이오드가 신뢰성 측면에서 가장 취약한 소자로 평가되었다. 하지만 모든 전력 반도체 소자의 수명이 100년 이상으로 예측되어 개별적인 전력 반도체 소자의 수명은 일반적인 철도차량의 내구연한인 20년을 만족하는 것을 확인하였다. 반도체 변압기는 많은 수의 전력 반도체 소자들로 구성되어 있어 시스템 수준에서의 수명 평가 또한 필요하다. 추후 모든 전력 반도체 소자와 커패시터 등과 같은 신뢰성 취약소자들을 포함한 반도체 변압기 시스템 수준에서의 신뢰성 평가 방법에 대해 연구를 진행할 예정이다.

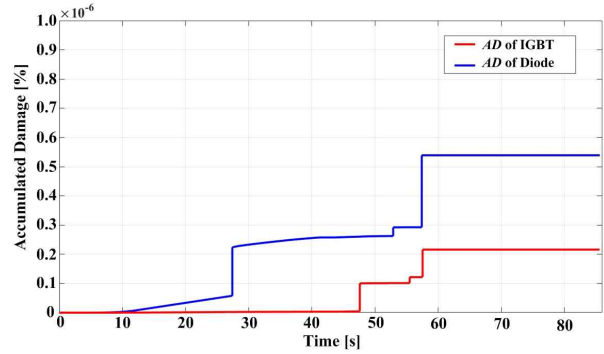


Fig. 14. Accumulated damage of IGBT and Diode during a period of the mission profile.

TABLE II
ACCUMULATED DAMAGE OF POWER DEVICES IN
SOLID-STATE TRANSFORMER

Converter	Device	Accumulated Damage
AC-DC	IGBT	$2.2 \cdot 10^{-9}$
	Diode	$5.4 \cdot 10^{-9}$
DC-DC (Primary)	SiC-MOSFET	$1.7 \cdot 10^{-9}$
	SiC Diode	Not considered
DC-DC (Secondary)	SiC-MOSFET	$2.7 \cdot 10^{-11}$
	SiC Diode	$2.1 \cdot 10^{-11}$

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호: 20RTRP-B146050-03)

References

- [1] F. An, W. Song, K. Yang, S. Yang, and L. Ma, "A simple power estimation with triple phase-shift control for the output parallel DAB DC-DC converters in power electronic traction transformer for railway locomotive application," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 5, No. 1, pp. 299-310, Mar. 2019.
- [2] J. Yang, J. Liu, Y. Shi, N. Zhao, J. Zhang, L. Fu, and T. Q. Zheng, "Carrier-based digital PWM and multirate technique of a cascaded H-bridge converter for power electronic traction transformers," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 1207-1223, Jun. 2019.
- [3] J. Zhang, J. Liu, J. Yang, N. Zhao, Y. Wang, and T. Q. Zheng, "A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 3, pp. 2119-2133, Mar. 2019.

- [4] J. H. Park, M. Y. Kim, and J. S. Lee, "Configuration analysis of solid-state transformer system for railway vehicle," *Journal of Korean Society for Railway*, Vol. 23, No. 4, pp. 359-373, Apr. 2020.
- [5] J. E. Huber and J. W. Kolar, "Volume/weight/cost comparison of a 1MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA*, pp. 4545-4552, 2014.
- [6] U. M. Choi, F. Blaabjerg, and K. B. Lee, "Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 5, pp. 2517-2533, May 2015.
- [7] M. Ciappa, "Selected failure mechanism of modern power modules," *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, No. 4/5, pp. 653-667, Apr./May. 2002.
- [8] L. Wang, D. Zhang, Y. Wang, B. Wu, and H. S. Athab, "Power and voltage balance control of a novel three-phase solid-state transformer using multilevel cascaded H-bridge inverters for microgrid applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 4, pp. 3289-3301, Apr. 2016.
- [9] H. Shi et al., "Minimum-backflow-power scheme of DAB-based solid-state transformer with extended-phase-shift control," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, No. 4, pp. 3483-3496, Jul./Aug. 2018.
- [10] U. M. Choi, K. Ma, and F. Blaabjerg, "Validation of lifetime prediction of IGBT modules based on linear damage accumulation by means of superimposed power cycling tests," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 4, pp. 3520-3529, Apr. 2018.
- [11] M. Musallam and C. M. Johnson, "An efficient implementation of the rainfall counting algorithm for life consumption estimation," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 61, No. 4, pp. 978-986, Dec. 2012.
- [12] R. Bayerer, T. Herrmann, T. Licht, J. Lutz, and M. Feller, "Model for power cycling lifetime of IGBT modules - various factors influencing lifetime," in *Integrated Power Systems (CIPS), 2008 5th International Conference*, pp. 1-6, Mar. 2008.
- [13] U. Scheuermann and R. Schmidt, "A new lifetime model for advanced power modules with sintered chips and optimized Al wire bonds," in *PCIM Europe (Power Conversion Intelligent Motion)*, May 2013.
- [14] A. Faremi and L. Yang, "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials," *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 1, pp. 9-34, Jan. 1998.



최의민(崔毅敏)

2011년 아주대 전자공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2016년 Department of Energy Technology, Aalborg University(덴마크) 졸업(공학박). 2016년~2018년 동 대학원 박사후연구원. 2018년~현재 서울과학기술대 전자IT미디어공학과 조교수. 당 학회 편집위원.



박진혁(朴珍赫)

2013년 아주대 전자공학부 졸업. 2018년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 2018년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.



김명룡(金明龍)

1989년 중앙대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1991년~1995년 현대정공(주) 기술연구소 근무. 1995년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원.



이준석(李濬錫)

2011년 아주대 전자공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 2015년~2020년 한국철도연구원 선임연구원. 2020년~현재 단국대 전자전기공학부 조교수. 당 학회 편집위원.