

WBG 전력 반도체의 수명 진단을 위한 향상된 온도 추정 정확도를 가진 Vsd 기반 측정 회로

차명준¹⁾, 민성수²⁾, 김래영¹⁾

¹⁾한양대학교 에너지전력전자 연구실, ²⁾한국전기연구원

Vsd-Based Measurement Circuit with Improved Temperature Estimation Accuracy for Lifetime Diagnosis of WBG Power Semiconductors

Myeong-Jun Cha¹⁾, Sung-Soo Min²⁾, Rae-Young Kim¹⁾

¹⁾Energy Power Electronics Control System Lab, Hanyang University, ²⁾Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

본 논문에서는 SiC 전력반도체의 수명 진단을 위해 정선 온도를 정확하게 추정할 수 있는 측정 회로를 제안한다. 이 측정 회로는 온도에 민감한 전기적 파라미터(TSEP) 중 하나인 바디 다이오드 도통 전압을 측정하여 온도를 추정하며, 기존 회로보다 높은 측정 민감도를 제공하여 온도 추정의 정확도를 향상시킨다. 제안된 회로는 LTspice 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, IR 카메라와 기존 회로의 온도 측정 결과와 비교하여 그 정확도를 검증하였다.

1. 서론

SiC MOSFET은 Si 기술보다 더 높은 온도, 전압 및 스위칭 속도에서 우수한 재료 특성을 가지며, 이러한 특성을 통해 에너지 변환의 효율성을 높여 전력 변환기의 크기와 효율을 개선할 수 있다. 이러한 이유로 최근 SiC MOSFET을 활용하여 전기자동차, 비행기, 우주선, 전기선박, 신재생에너지 등 새로운 응용 분야에 활용되고 있다. 이러한 응용 분야의 유지 관리 비용 절감 및 사람의 안전이 중요하기 때문에 전력 변환기의 신뢰성 및 내구성은 중요한 요소^[1]이다. 따라서 전력 반도체의 수명 예측 연구는 전력 변환기의 신뢰성 향상을 위해 필수적이다.

전력 반도체의 수명 예측 모델은 특정 조건에서 가정된 고장 메커니즘을 통한 고장 물리학 모델에 기반을 두고 있다. 이러한 모델은 Power Cycling Test(PCT)를 통해 전력 반도체의 파워 사이클 수명(Nf)을 추정하며, LESIT 모델, Coffin-Manson 모델 등 다양한 모델이 현재까지 연구되어 왔다. 이러한 모델의 방정식은 정선 온도의 변화와 밀접한 관련성이 있기 때문에, 전력 반도체의 정확한 정선 온도를 추정해야 수명 예측의 정확도가 높아진다.

SiC MOSFET의 정선 온도를 측정하는 방법은 크게 직접적인 방법과 TSEP를 활용한 간접적인 방법으로 나뉜다. 직접적인 방법에는 IR 카메라, 써모커플, 광섬유 등을 통해 온도를 직접 측정하는 방법이 있으며, 이 방법은 측정 정확도가 높지만 고 대역폭 온도 측정이 어렵고, 전력 반도체의 패키지를 제거해야 하는 단점이 있다. 반면, TSEP를 활용한 간접적인 방법은 직접적인 방법보다 측정 정확도는 다소 낮고 추가적인 회로가 필요하지만, 패키지를 제거하지 않아도 되고 빠른 응답 특

성을 가지며 실시간 모니터링에 유용하다.

정확한 온도 추정을 위해 TSEP 기반 측정 민감도를 증가시키는 방법이 연구되어왔다. 참고논문^[2]은 Vth 기반 정선 온도 추정 방법을 제안하면서 게이트 저항을 키워 측정 민감도를 증가시켰다. 참고논문^[3]에서는 게이트 전류 기반 정선 온도 추정 방법을 제안하여, 게이트 전류의 선택 방법을 달리함으로써 기존 논문에 비해 측정 민감도를 약 20배 증가시키며 온도 추정의 정확도를 올렸다.

따라서 본 논문에서는 TSEP 중 파워 사이클 횟수에 따라 전압 변화가 크게 일어나지 않아 노화에 대한 영향이 적어 수명 예측 파라미터로 많이 사용되고 있는^[4] 바디 다이오드 도통 전압 기반 측정 회로를 제안한다. 본 연구는 측정 민감도가 향상된 이 회로를 통해 온도 추정의 정확도를 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증한다.

2. LESIT 모델

전력 반도체의 수명주기는 반도체 소자가 정상 상태에서 수만 번에서 수십만 번의 사이클링 횟수 동안 동작할 수 있는 시간을 의미한다. 수명주기를 예측하는 방법 중 LESIT 모델은 전력 반도체의 수명을 예측할 때 많이 사용되며, 식 (1)을 통해 수명주기를 구할 수 있다.

$$N_f = A \cdot (\Delta T_j)^\alpha \cdot \exp\left(\frac{E_g}{k_B \cdot T_m}\right) \quad (1)$$

식 (1)의 A는 재료와 시험을 통해 얻는 값이며, E_g는 활성화 에너지, K_B는 볼츠만 상수를 나타낸다. 이러한 값들은 PCT 실험을 통해 구할 수 있다. 또한, 이 모델에는 정선 온도의 변화량 및 정선 온도의 평균값이 포함되어 있다. 5K의 온도 측정 불확실성은 수명 추정에 약 28%의 오차를 발생시킬 수 있기 때문에 정확한 온도 측정이 매우 중요하다^[5].

3. Vsd 기반 측정 회로

3.1 일반적인 Vsd 측정 회로

Vsd 기반 측정 회로는 바디 다이오드에 정전류를 흘려주고 그때 바디 다이오드에 걸리는 전압을 측정하는 회로이다. 또한 측정 회로는 부하 전류에 대한 보호가 필요하므로 이를 위한 보호용 스위치 M₁을 포함한다. 그림 1은 일반적인 Vsd 측정 회로의 구성을 보여준다.

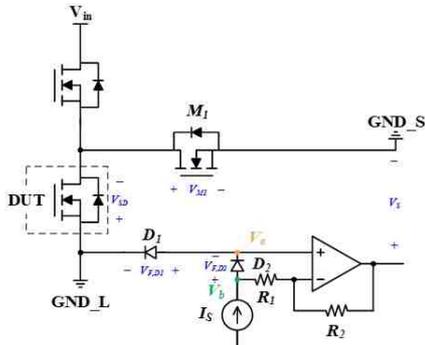


그림 1 일반적인 V_{sd} 측정 회로 구성
Fig. 1 Conventional V_{sd} measurement circuit configuration

3.2 V_{sd} 측정 회로 원리

그림 1의 V_{sd} 측정 회로는 바디 다이오드 전압을 그대로 Op-amp 출력 전압으로 나타낸다. D_2 는 D_1 과 같은 소자를 사용하며, 비반전 증폭기 구조를 통해 D_1 의 포워드 전압이 V_s 에 미치는 영향을 제거할 수 있다. 이러한 구조를 통해 V_s 는 보다 정확하게 V_{sd} 와 V_{M1} 에 의해 결정되며, D_1 의 포워드 전압에 대한 영향이 감소한다. 이러한 원리는 다음과 같다.

식 (2), (3)는 Op-amp에 걸리는 전압을 나타낸다.

$$V_a = V_{SD} + V_{F,D_1} + V_{M_1} \quad (2)$$

$$V_b = V_{SD} + V_{F,D_1} + V_{F,D_2} + V_{M_1} \quad (3)$$

식 (4)은 비반전 증폭기를 통한 출력 전압 V_s 를 나타낸다.

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_a - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_b \quad (4)$$

이때 R_1 과 R_2 가 같으면 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$V_s = 2V_a - V_b \quad (5)$$

식 (5)에 식 (2), 식 (3)를 대입하면 식 (6)와 같다.

$$V_s = V_{SD} + V_{F,D_1} - V_{F,D_2} + V_{M_1} \quad (6)$$

D_1 과 D_2 가 같은 소자이면 출력전압 V_s 는 식 (7)과 같이 나타난다.

$$V_s = V_{SD} + V_{M_1} \quad (7)$$

따라서 R_1 , R_2 가 같고, D_1 과 D_2 가 같은 소자이면 다이오드의 포워드 전압의 영향을 없애고 V_{sd} 전압을 측정할 수 있다.

3.3 일반적인 V_{sd} 측정 회로 측정 민감도

그림 2는 일반적인 V_{sd} 측정 회로의 온도에 따른 출력 전압 변화를 보여준다. 이때 DUT는 Cree社의 C2M0080120D 소자를 사용했고, 센싱 전류 I_s 는 80mA, 게이트 전압은 -5V 조건에서 측정된 결과이다. 측정된 측정 민감도는 -2.4mV/°C이다. 실제 V_{sd} 값과 측정 회로 출력 전압 간의 측정 오차가 24mV일 경우, 온도 추정 오차는 10°C가 된다. 따라서 측정 오차를 줄이거나 측정 민감도를 증가시키면 온도 추정의 정확도는 상승한다.

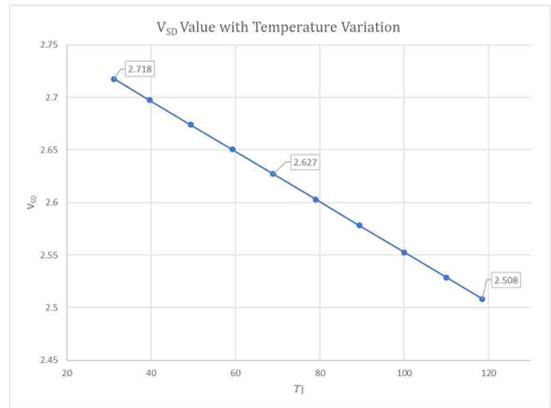


그림 2 정선 온도에 따른 Vsd 값

Fig. 2 Vsd value with temperature variation

4. 제안하는 측정 회로

4.1 제안하는 V_{sd} 측정 회로

그림 3은 측정 민감도를 증가시키기 위해 일반적인 측정 회로에 비반전 가산 증폭기를 추가한 V_{sd} 측정 회로 구성을 보여준다.

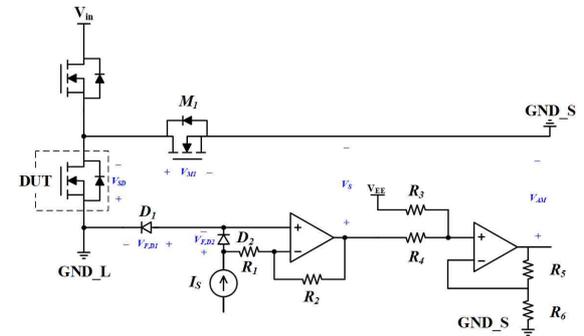


그림 3 제안하는 V_{sd} 측정 회로 구성

Fig. 3 Proposed V_{sd} measurement circuit configuration

제안하는 측정 회로는 일반적인 측정 회로의 출력인 V_s 의 오프셋 전압을 가산회로를 통해 낮추고, 이를 증폭시켜 측정 민감도를 향상시킬 수 있다.

제안하는 측정 회로의 출력 V_{AM} 은 식 (8)과 같다.

$$V_{AM} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot V_s + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V_{CC} \right) \times \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right) \quad (8)$$

4.2 시뮬레이션 검증

그림 4는 LTspice를 통해 해당 측정 회로가 온도에 따라 잘 동작 하는지 검증을 위한 시뮬레이션 모델을 보여준다. Parameter Sweep을 통해 온도를 30°C에서 80°C 가변하여 시뮬레이션 한 결과는 그림 5에 나타난다. 시뮬레이션 결과로 기존 측정 민감도가 6.74mV/°C에서 35.48mV/°C로 상승함을 확인했다.

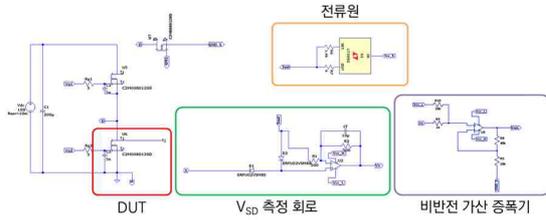


그림 4 LTspice 시뮬레이션 모델
Fig. 4 LTspice simulation model

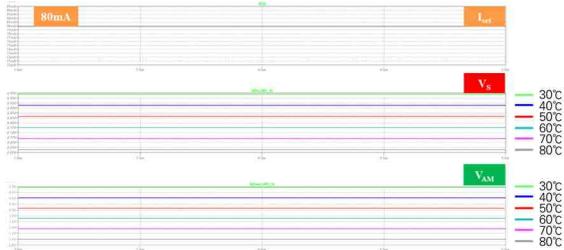


그림 5 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation result

4. 실험 검증

그림 6은 제안하는 회로를 검증하기 위한 실험 환경을 보여준다. 실험은 30°C에서 120°C까지 핫플레이트를 통해 DUT의 온도를 변화시키며 IR카메라로 찍은 DUT의 정선 온도와 측정 회로를 통해 추정된 정선 온도를 비교한다. 표 1을 보면 일반적인 측정 회로 결과보다 온도 추정의 오차가 적은 것을 확인했다.



그림 6 실험 환경
Fig. 6 Test environment

표 1을 보면, 제안하는 측정 회로가 일반적인 측정 회로보다 온도 추정 오차가 적다는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 측정 회로는 약 3°C의 온도 오차를 가지지만, 제안하는 회로는 약 0.5°C의 오차를 보여 수명 예측 시 제안하는 회로를 적용하면 더 높은 정확도의 결과를 가질 수 있다.

표 1 온도 측정 결과

Table 1 Temperature Measurement Results

IR 카메라 온도	일반적인 방법 오차	제안하는 방법 오차
30°C	3.75°C	0.48°C
40°C	3.75°C	0.5°C
50°C	3.75°C	0.5°C
60°C	3.33°C	0.52°C
70°C	3.33°C	0.5°C
80°C	3.33°C	0.58°C
100°C	3.33°C	0.58°C
120°C	3.33°C	0.58°C

5. 결론

본 논문에서는 전력 반도체의 수명 예측에 있어 중요한 온도 추정의 정확도를 높이기 위한 회로를 제안한다. 제안하는 회로는 기존 대비 측정 민감도를 증가시켜 온도 추정의 오차를 줄이며, 이는 비반전 가산 증폭기 회로를 통해 달성되었다. LTspice 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한 결과, 기존 회로 대비 제안하는 회로의 온도 오차가 약 3°C 감소함을 확인하였다.

본 논문은 한국전기연구원 위탁연구과제(과제명 : 와이드 밴드갭 전력반도체 예측 진단 알고리즘 실증 연구)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

참고 문헌

- [1] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran and P. Tavner, "Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 11, pp. 2734-2752, Nov. 2010.
- [2] X. Jiang et al., "Online Junction Temperature Measurement for SiC MOSFET Based on Dynamic Threshold Voltage Extraction," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 4, pp. 3757-3768, April 2021.
- [3] Q. Zhang and P. Zhang, "An Online Junction Temperature Monitoring Method for SiC MOSFETs Based on a Novel Gate Conduction Model," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 10, pp. 11087-11096, Oct. 2021.
- [4] F. Yang, E. Ugur and B. Akin, "Evaluation of Aging's Effect on Temperature-Sensitive Electrical Parameters in SiC mosfets," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 6, pp. 6315-6331, June 2020.
- [5] C. Herold, M. Beier, J. Lutz and A. Hensler, "Improving the accuracy of junction temperature measurement with the square-root-t method," 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), Berlin, Germany, 2013.