

# 손실 모델을 적용한 SiC MOSFET용 능동 게이트 드라이버의 Closed-loop 제어 방법

강운아, 김경민, 김래영  
한양대학교 전기공학과

## Loss Model Based Closed-Loop Control Method for SiC Active Gate Driver

Yun-A Kang, Kyung-Min Kim, Rae-young Kim  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문은 정확한 모델링이 요구되는 모델 기반 제어 방식의 한계를 개선하기 위해 전압/전류 오버슈트와 과도 구간 시간을 측정하고 이를 반영한 손실 모델을 제안한다. 제안하는 손실 모델은 오버슈트와 시간을 독립적으로 측정하여 턴-온 시에는 전류 상승에 따른 전압 변동을 반영하였고, 턴-오프 시에는 기생 인덕턴스에 의한 영향을 제거하였다. 또한, 전압에 따른 SiC MOSFET 커패시턴스의 평균값을 전류 변동에 반영하여 모델에 대한 정확성을 높였다. 본 모델은 LT-spice 시뮬레이션 값과 비교하여 손실 모델의 정확성을 검증하였다.

### 1. 서론

SiC(Silicon Carbide) MOSFET는 기존 Si-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistors) 대비 물리적인 특성이 개선되어 높은 정격전압을 가질 수 있으며, 내부 기생 커패시터가 작아 고속 스위칭이 가능하다. 고속 스위칭으로 인한 빠른 Slew-rate는 스위칭 손실을 저감할 수 있지만 오버슈트와 스위칭 노이즈를 증가시킨다. Slew-rate가 발생하는  $dv/dt$ 와  $di/dt$  구간은 각각 오버슈트와 손실에 영향을 미치므로 해당 구간에서 게이트 전압, 전류, 저항을 제어하면 스위칭 성능을 개선할 수 있다<sup>[1]</sup>. 또한, 해당 구간을 독립적으로 제어하게 되면 다른 구간의 특성에 영향을 미치지 않으면서 원하는 제어를 수행할 수 있다. 이러한 특성을 고려하여 SiC MOSFET을 고전압, 고효율, 고전력 밀도 시스템에 적용하기 위해 스위칭 과도 구간을 독립적으로 제어하여 전체적인 스위칭 성능을 개선할 수 있는 능동 게이트 드라이버가 요구된다<sup>[2]</sup>.

능동 게이트 드라이버는 제어 전략에 따라 Open-loop와 Closed-loop으로 나뉜다. Open-loop의 경우 사전에 정의된 게이트 저항, 전압, 전류를 통해 스위칭 성능을 개선하는 방식이다. 이는 구현이 쉽다는 장점이 있지만, 부하 변동에 따른 변화를 반영하지 못한다는 단점이 있다.

Closed-loop의 경우 측정이나 모델 기반으로 스위칭 과도 구간을 파악하고 게이트 저항, 전압, 전류를 변화하여 스위칭 성능을 개선하는 방식이다. 측정 기반의 경우 전압과 전류의 기울기나 시간 등을 직접 측정을 통해 제어한다. Y.Lobsiger의 경우 전압과 전류의 Slew-rate를 측정하고 Closed-loop 시스템의 응답성과 기생 인덕턴스, 전기적인 단자에 대한 파라미터들을 모두 고려한 IGBT 모델을 도출하여 전압과 전류의 기울기를 독립적으로 제어하는 방식을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 이 방식은 변화

하는 slew-rate를 반영하여 제어할 수 있지만, 모델의 복잡성이 높고 High-band width를 가지는 센서가 요구되는 단점이 있다. 또한, 과도 시간이 수십 ns로 짧은 SiC의 경우 Digital IC의 propagation delay, AD Conversion time, 연산 시간 등을 고려할 때 과도 구간에서 제어를 구현하는 데 한계가 있다. 따라서 SiC MOSFET에 측정 기반 제어 방식을 적용하기 위해 측정된 값을 계산하고 몇 주기 뒤에 결과를 반영하는 반복제어(Adaptive Control)를 통해 Digital 제어의 한계를 보완할 필요가 있다.

모델 기반의 경우 데이터 시트 기반의 수학적 모델을 통해 스위칭 과도 구간에서의 전압과 전류 등을 도출한다. Ling Yatao의 경우 손실 모델 기반의 Self-regulating 제어 방식을 통해 IGBT의 스위칭 딜레이, 손실, 그리고 오버슈트를 저감하는 방법을 제안하였다<sup>[4]</sup>. 이는 데이터 시트와 실험 기반의 Look-up Table(LUT)을 통해 Reverse Recovery 전류를 모델링하였으며, 과도 구간의 시간을 측정하여 반복 제어를 위한 손실 모델에 반영하였다. 하지만, 이는 사전에 LUT를 제작하는 과정이 필요하며 높은 정확도의 모델링이 요구된다. 또한, 제어를 위해 모든 과도 구간의 시간과 손실에 대한 Reference를 요구하며 이에 대한 기준이 모호하다. Zhao, Shuang의 경우 과도 구간의 시간, slew-rate, 손실을 고려한 Trajectory Model과 노이즈와 손실 간의 관계를 반영한 Cost Function을 통해 SiC MOSFET을 Indirect Control 하는 방식을 제안하였다<sup>[5]</sup>. 하지만, 이 방식은 Main Control Unit을 통해 BUS 전압과 부하 전류를 측정하여 하위 제어기에서의 계산 오차를 발생시키며, 데이터 시트 기반으로 고정된 파라미터를 사용하여 과도 구간의 변화를 정확하게 예측하기 어렵다. 따라서 모델 기반의 방식은 소자 모델링의 정확도에 따라 계산값이 의존된다는 단점이 있다.

본 논문에서는 모델 기반 방식의 한계를 개선하기 위해 전압, 전류의 오버슈트 그리고 과도 구간 시간을 직접 측정하고 이를 반영한 손실 모델을 제안한다. 제안하는 손실 모델은 턴-온 시  $di/dt$ 과  $dv/dt$  구간의 시간을 각각 측정하여 손실을 독립적으로 계산하였으며, 오버슈트를 측정하여 턴-온 시에는 전류 상승에 따른 전압 강하를 반영하고 턴-오프 시에는 기생 인덕턴스에 대한 영향을 제거했다. 또한, 전압에 따라 변화하는 SiC MOSFET 커패시턴스의 평균값을 전류 변동에 반영해 모델의 정확도를 높였다. 제안하는 모델은 LTspice와 비교하여 정확성을 검증하였으며 턴-온의 경우  $di/dt$ 와  $dv/dt$  구간의 손실을 독립적으로 계산할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 제안하는 Reference Generator 제어 모델

### 2.1절 제안하는 손실 모델

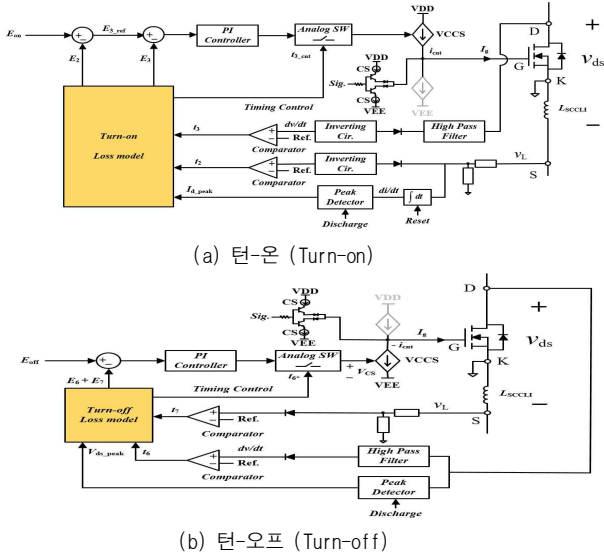


그림 1 제안하는 손실모델 기반의 제어 방식  
Fig. 1 Proposed loss model based control method

제안하는 손실 모델은 그림 1과 같다. 스위칭 손실은 시간에 대한 전압과 전류의 곱으로 계산할 수 있기에 정확한 전압 및 전류 레벨과 시간을 파악하면 손실 계산의 정확도를 향상할 수 있다. 본 모델은 턴-온 시 di/dt와 dv/dt 구간의 시간을 각각 측정하여 각 구간의 손실을 독립적으로 계산한다. 하지만, 턴-오프 시에는 부하에 따라 전압과 전류 구간이 명확하지 않고 cross-over 되는 현상이 나타나기 때문에, 전체 턴-오프 손실을 feedback 받아 제어한다. 계산된 값은 PI 제어기를 거쳐 Voltage Control Current Source(VCCS)를 통해  $i_{ctrl}$ 로 손실을 제어한다. 이때 dv/dt 구간에서의 제어를 위해 Analog SW를 통해 Timing Control을 진행한다.

### 2.2절 스위칭 과도 구간과 손실 모델의 구성

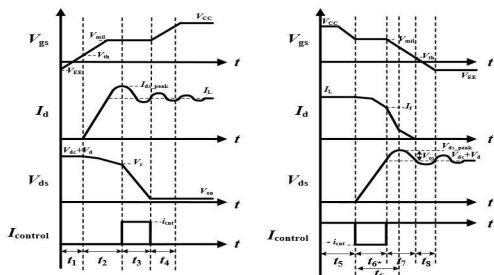


그림 2 제안하는 제어 방식을 포함한 스위칭 파형  
(a) 턴-온 (b) 턴-오프  
Fig. 2 Switching waveforms with the proposed control Method (a) Turn-on (b) Turn-off

SiC 소자의 이상적인 스위칭 파형은 그림 2와 같다. 그중  $t_2$ ,  $t_7$ 에서는 전류 변동에 따라 di/dt가 발생하며,  $t_3$ ,  $t_6$ 에서는

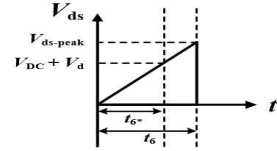


그림 3 턴-오프 시 전압, 전류 구간 분리를 위한 계산 방법  
Fig. 3 Calculation Method for separating Voltage and Current Stage at turn-off

전압 변동에 따라 dv/dt가 발생한다. di/dt 구간의 제어는 오버슈트에 영향을 미치며, dv/dt 구간의 제어는 손실에 영향을 미친다. 하지만, 턴-오프 시  $t_6$ 에서 제어할 경우 오버슈트에 영향을 미칠 수 있으므로  $V_{ds}$ 이  $V_{DC} + V_d$  구간에 도달하는  $t_{6^*}$ 에서 제어가 필요하다. 따라서, 스위칭 손실을 개선하기 위해  $t_3$ 와  $t_{6^*}$ 에서  $I_{control}$ 의 제어가 필요하다.

턴-온 시, 수식 (1)-(2)에 따라 전류 오버슈트 시  $V_{ds}$  값인  $V_r$ 과 di/dt 구간에 대한 손실을 구한다.  $L_{SCCLI}$ 는 SiC MOSFET 내부의 드레인과 소스 사이의 인덕턴스를 포함한 전체 Stray Inductance를 의미한다. 수식 (3)-(5)에 따라 reference 손실과 dv/dt 구간의 손실을 도출하여 dv/dt 구간의 손실을 제어한다. 수식 (6)을 통해  $V_{ds}$ 에 따른 커패시턴스의 값을 평균화하여 반영하였다<sup>[6]</sup>.

$$V_r = V_{DC} + V_d - L_{SCCLI} \frac{I_{d_{peak}}}{t_2} \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} (V_r I_{d_{peak}} t_2) \quad (2)$$

$$E_{3-ref} = E_{on} - E_2 \quad (3)$$

$$E_3 = \frac{V_r I_L t_3}{2} + V_r Q_{oss} \quad (4)$$

$$E_3' = E_{3-ref} - E_3 \quad (5)$$

$$Q_{oss} = C_{avg1} \frac{L_{SCCLI} I_{d_{peak}}}{t_2} \quad (6)$$

턴-오프 시, 수식 (8)에 따라  $V_{ds}$ 의 값이  $V_{DC} + V_d$ 일 때의  $I_f$  전류 값인  $I_f$ 를 구할 수 있다.  $I_f$ 의 값을 정확하게 계산하고자  $0 \sim (V_{DC} + V_d)/2$ ,  $(V_{DC} + V_d)/2 \sim (V_{DC} + V_d)$  구간에서의 커패시턴스를 각각 평균값으로 반영하였다. 또한, 그림 3과 수식 (8)에서 직각 삼각형의 닮음비와 오버슈트를 직접 측정하여  $t_{6^*}$  구간을 분리하였다. 수식 (10)-(11)를 통해 턴-오프 시 손실을 계산한다<sup>[7]</sup>. 이후, 수식 (12)를 통해 전체 턴-오프 손실을 제어한다.

$$I_f = I_L - (C_{avg2} + C_{avg3}) \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

$$t_6 : V_{ds-peak} = t_{6^*} : (V_{DC} + V_d) \quad (8)$$

$$t_7 = t_{off} - t_{6^*} \quad (9)$$

$$E_{6^*} = \frac{(V_{DC} + V_d) * (I_L + 2I_f) * t_{6^*}}{6} \quad (10)$$

$$E_7 = \frac{V_{DC} I_f t_7}{2} + \frac{V_{os} I_L t_7}{\pi} \quad (11)$$

$$E_{off}' = (E_{6^*} + E_7) - E_{off} \quad (12)$$

### 2.3절 제안하는 손실 모델의 검증

제안하는 손실 모델의 정확성을 검증하기 위해 1.7kV/310A의 SiC Power Module(CAS310M17BM3)을 타겟으로 800V/200A 조건의 Double-pulse test를 LT-spice에서 구현하였다. 턴-온과 오프 시 각각 전류 오버슈트와 dv/dt 구간 시간에 따른 손실을 계산하고자 게이트 전류를 1A~3A, -0.5A~-2A에서 제어하였다. 표 1과 그림 4에서 게이트 전류에 따른 시뮬레이션과 제안하는 모델을 통한 스위칭 손실을 비교하였다. 턴-온 di/dt 구간, dv/dt 구간에서 손실의 평균은 각각 6.26%, 5.83%이며, 턴-오프 전체 손실의 평균은 4.43%로 계산되었다. 이에 따라 턴-온 시 오버슈트와 di/dt와 dv/dt 구간의 시간을 각각 측정하여 손실을 독립적으로 계산할 수 있음을 파악하였다. 턴-오프에서는 오버슈트와 시간을 측정함에 따라 기생 인덕턴스에 대한 영향을 제거하며 손실 계산의 정확도를 높였음을 확인하였다. 오버슈트를 측정하면 slew-rate를 정확하게 계산할 수 있을 뿐만 아니라 직접 오버슈트를 제어할 수 있다. 해당 손실 모델은 추후 부스트 컨버터에 적용하여 반복제어를 통해 손실 제어 가능성을 검토할 예정이다.

표 1 게이트 전류에 따른 스위칭 손실의 비교  
Table 1 Comparison of Switching Loss due to gate current

$I_g$ [A]	1	2	3
$E_{2-SIM}$ [mJ]	10.95	7.1	5.68
$E_{2-Model}$ [mJ]	12.5	7.5	5.76
$E_2$ -Error [%]	12.4	5	1.39
$E_2$ -Error avg. [%]	6.26		
$E_{3-SIM}$ [mJ]	6.73	2.96	1.81
$E_{3-Model}$ [mJ]	7.13	2.98	2.04
$E_3$ -Error [%]	5.6	0.6	11.3
$E_3$ -Error avg. [%]	5.83		
$I_g$ [A]	-0.5	-1	-2
$E_{off-SIM}$ [mJ]	29.7	12.4	4.9
$E_{off-Model}$ [mJ]	30.16	13.32	5.15
$E_{off}$ -Error[%]	1.5	6.9	4.9
$E_{off}$ -Error avg. [%]	4.43		

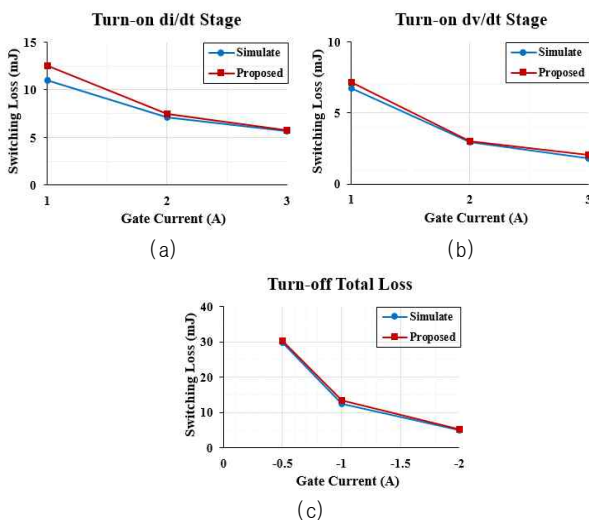


그림 4 게이트 전류에 따른 스위칭 손실의 비교

(a) 턴-온 di/dt 구간 (b) 턴-오프 dv/dt 구간  
(c) 턴-오프 전체 구간

Fig. 4 Comparison of switching losses according to gate current (a) di/dt Stage (b) dv/dt Stage (c) turn-off total Stage

### 3. 결론

본 논문은 오버슈트 및 과도 구간 시간을 측정하고 이를 반영한 손실 모델을 제안하였다. 제안하는 모델은 LT-spice 시뮬레이션과 비교하여 손실 모델의 정확성을 검증하였다. 이를 통해 턴-온과 오프에서 모두 전압에 따른 커패시턴스를 평균화하여 전류 변동에 반영해 손실 계산의 정확성을 높임을 확인하였다. 또한, 턴-온 시에는 오버슈트와 전압과 전류 구간의 시간을 각각 측정하여 독립적으로 손실 계산이 가능하며, 턴-오프 시에는 오버슈트와 시간을 측정하여 모델에 반영해 기생 인덕턴스에 의한 영향을 제거하여 손실 계산의 정확성을 높일 수 있음을 확인하였다.

본 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20225500000090, 특고압 직류배전용 멀티터미널제어시스템 고도화 및 컨버터스테이션 엔지니어링 기술 개발)

### 참고 문헌

- [1] Zhao, Shuang, et al. "A review of switching slew rate control for silicon carbide devices using active gate drivers." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 9.4 (2020): 4096-4114.
- [2] Ling, Yatao, Zhengming Zhao, and Bochen Shi. "A Self-Regulating Method for IGBT Turn-Off Peak Voltage Control With Turn-Off Characteristics Improvement." IEEE Access 9 (2021): 122207-122215.
- [3] Y. Lobsiger and J. W. Kolar, "Closed-Loop di/dt and dv/dt IGBT Gate Driver," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 6, pp. 3402-3417, June 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2332811
- [4] Ling, Yatao, Zhengming Zhao, and Yicheng Zhu. "A self-regulating gate driver for high-power IGBTs." IEEE Transactions on Power Electronics 36.3 (2020): 3450-3461.
- [5] Zhao, Shuang, et al. "An intelligent versatile model-based trajectory-optimized active gate driver for silicon carbide devices." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 8.1 (2019): 429-441.
- [6] Wang, Xudong, et al. "Analytical methodology for loss calculation of SiC MOSFETs." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 7.1 (2018): 71-83.
- [7] Zheng, Jialin, et al. "Mechanism Segmentation Transient Model of SiC MOSFETs for Multi-rate Electro-thermal Simulation." 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2023.