

# 전력용 반도체 스위칭소자 손실계산 방법의 비교

오창열, 한지훈, 신승민, 이병국  
성균관대학교 정보통신공학부

## Comparison of Losses Calculation Method for Power Semiconductor Switching Device

Chang-Yeol Oh, Ji-Hun Han, Seung-Min Shin, and Byoung-Kuk Lee  
School of Information and Communication Engineering, SungKyunKwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 기존에 선행되었던 연구를 바탕으로 반도체 물성을 이용한 방법, 실험을 통한 방법, 수치해석적인 방법, 그리고 전류제어를 기반한 ON-TIME 해석에 대하여 비교하였다. 특히 전력전자분야에서 폭넓게 사용되고 있는 IGBT의 손실계산에 초점을 맞추어 반도체 물성을 기반으로 한 방법 및 선형 종속에 대한 근사화를 통한 방법을 적용하여 자세한 비교를 하였다.

### 1. 서 론

최근 다양한 형태의 에너지를 복합적이고 효율적으로 활용하기 위해서 전력전자 기술을 이용한 시스템에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 시스템을 구성하기 위해서 스위치를 이용한 토폴로지를 사용하고 있고, 회로에서 효율 개선을 위해 전력용 반도체 스위칭 소자의 손실계산은 필수적인 요소이다. 이를 위해 다양한 파라미터들이 필요하고, 그에 초점을 맞추어 여러 분야에서 연구가 진행되어 왔다. 이들 방법을 구분해보면 반도체 물성을 기반으로 스위치의 전압·전류를 계산하는 방법, 실험을 통해 파라미터 추출 및 모델링 하는 방법, 그리고 제조사에서 제공하는 데이터시트 값들을 이용하여 수치해석적 기법을 통해 근사화 시키는 방법이 있다<sup>[1]</sup>.

따라서 본 논문에서는 앞서 언급한 범주에 속하는 다양한 방법들에 대하여 비교한다. 특히 전력전자분야에서 폭넓게 사용되고 있는 IGBT모듈에 적용하여 반도체 물성을 기반으로 스위칭 동안의 손실계산 및 수치해석법을 통해서 선형 근사화 모델링 기법에 대한 세부적인 비교를 한다.

### 2. 본 문

#### 2.1 반도체 스위칭 소자 손실계산 방법<sup>[1]</sup>

해석기법의 종류에 따라서 다양한 반도체 스위칭 소자 손실 계산 방법이 존재한다.

반도체 물성을 기반으로 하여 스위치 ON-OFF동안의 전압, 전류 파형을 제공하는 모델과 특정 시간 동안 소자의 온도를 측정하여 반도체 물성으로 계산하는 것이 있다. 또한 모듈의 실시간 온도 시뮬레이션을 통해 손실을 추론한 모델과 스위치의 ON-TIME을 전류 제어에 따른 응답특성 분석으로 도통 및 스위칭 손실을 분석하는 방법 역시 사용된다. 전류, 저지 전압

혹은 온도 등 파라미터 해석에 의존하여 정의된 조사표를 이용한 계산, 수치해석 시뮬레이션을 통해 단일 소자에 대한 손실을 스위칭 횟수의 중첩 합으로 구하는 방법, 그리고 수치해석법에 이미 측정된 데이터, 즉 데이터시트를 이용하여 온도에 따른 손실 및 전류에 대한 선형성을 간편한 방정식으로 표현하여 보완한 것 역시 이용되어지고 있다. 이러한 다양한 방법들에 대한 각각의 특성을 나타내보면 표 1과 같다.

표 1 손실계산 방법의 특성

방법	특성
ON-OFF 해석	▪ 고신뢰도 보장 및 외부변수에 능동적 ▪ 과도상태 및 권선인덕턴스의 영향
시구간 해석	▪ 측정 시 동작구간별 해석을 구분
실시간 온도 시뮬레이션	▪ 온도 반영이 정확함 ▪ 실제 동작환경 구현에 어려움
전류제어 응답	▪ 수학적 모델링이 쉽지만, 온도 영향이 큼
파라미터 해석	▪ 조사표 이용, 환경변수 반영에 어려움
수치해석법	▪ 빠른 수행시간 및 정확한 계산 ▪ 온도에 따른 선형성 반영

#### 2.2 손실계산 방법의 비교

전력전자분야에서 응용하기 적합한, 스위칭 및 산란된 권선 인덕턴스의 영향을 고려치 않고 전하저장영역에서 경계조건만 고려한 반도체 물성적 방법과 데이터시트를 기반으로 온도에 따른 손실 에너지 및 전류에 대한 선형 종속성을 간편한 방정식으로 표현한 수치해석법을 IGBT모듈에 적용해보겠다.

##### 2.2.1 반도체 물성을 기반한 방법<sup>[2]</sup>

준 중성영역에서 전하의 동적특성은 과잉 캐리어 집적도의 1, 2차 도함수와 고준위 캐리어 평균수명으로 표현 가능한 쌍극성 확산 방정식으로 나타난다. 이를 이용하여 과잉 캐리어 밀집도  $p(x,t)$ 로 전하저장영역에서의 전하 밀집도 및 경계조건을 구할 수 있다.

$$p(x,t) = p_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} p_k(t) \cos \left[ \frac{k' \pi (x - x_1)}{x_2 - x_1} \right] \quad (1)$$

식(1)을 이용해 그림 1에서와 같이 전하저장영역의 경계조건에서 전류 값을 구할 수 있다.

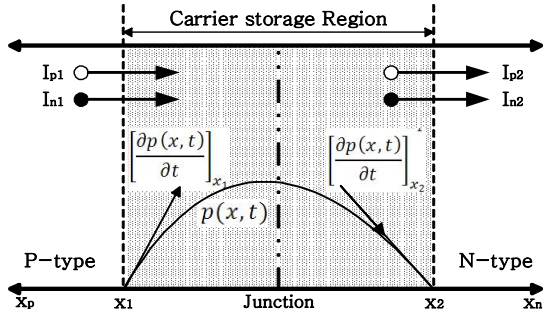


그림 1 전하저장영역에서의 경계조건

또한 전하저장영역에서의 전하 밀집도를 통해 순방향 전압강하  $V_{ce}$ 를 구할 수 있는데, 그 식은 다음과 같다.

$$V_{ce} = V_{J1} + V_b + V_d \quad (2)$$

$$V_{J1} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{p_{x1} p_{x2}}{n_i^2} \right) \quad (3)$$

$$V_b = \frac{I_C}{\mu A q} \int_{x1}^{x2} \frac{dx}{p(x,t)} \quad (4)$$

$$V_d = \frac{q}{2\epsilon_{si}} \left( N_B + \frac{I_C}{q A v_{sat}} \right) W_d^2 \quad (5)$$

여기서  $N_B$ 는  $n^-$  베이스의 도핑농도,  $v_{sat}$ 는 포화 이동속도,  $I_C$ 는 애노드 전류의 총량,  $W_d$ 는 공핍층의 폭을 나타낸다.

식(1)~(5)를 이용하면 반도체 스위치의 전압강하와 경계조건에서 도통 전류를 알 수 있고, 이를 통해 손실을 구할 수 있다.

### 2.2.2 수치해석적 선형화 방법

직렬로 연결된 소자에서, 전압강하와 전류에 관한 식으로 표현되는  $r_{on}$ 으로 손실계산이 가능하다. 데이터 시트로부터 얻을 수 있는 온도에 따른  $V_F$ ,  $V_{CE}$  그리고  $I_C$ 의 관계를 통하여 동작 온도에 따른 도통손실의 전류의존도를 구할 수 있다.

이를 그림 2와 같이 커브 피팅을 통하여 식(6)와 같은 2차 선형근사식으로 표현가능하다.

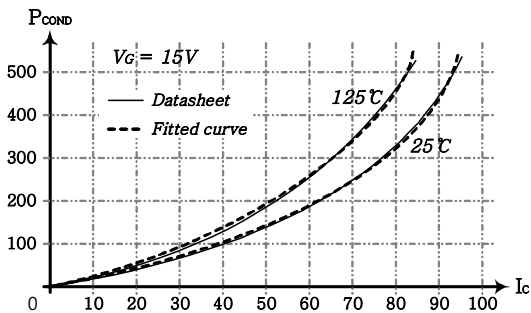


그림 2 전류에 따른 도통손실 계산

$$P_{COND} = c \cdot I_C + d \cdot I_C^2 \quad (6)$$

그림 2와 식(6)로부터 계수의 온도 종속성을 구할 수 있다.

$$x(T) = x_0 + x_1 T \quad (7)$$

계수의 온도 선형 방정식을 식(6)에 다시 대입해보면, 식(8)와 같이 손실을 전류와 온도로 표현이 가능하다.

$$P_{COND}(I_C, T) = (c_0 + c_1 T) I_C + (d_0 + d_1 T) I_C^2 \quad (8)$$

스위칭 손실지표  $k(I_C)$  역시 도통손실과 동일한 과정으로 계산되며, 이를 통해 식(10)와 같이 스위칭 손실이 표현된다.

$$k(I_C) = (a_0 + a_1 T) + (b_0 + b_1 T) I_C + (c_0 + c_1 T) I_C^2 \quad (9)$$

$$E_{SWITCH} = k_{IGBT}(I_C) \cdot I_C \quad (10)$$

식(8)와 식(10)의 합으로 IGBT의 총 손실을 구할 수 있다.

### 2.2.3 손실계산 결과의 비교

비교를 보인 두 가지 방법을 IGBT모듈에 적용해 보았다. 일반적으로 소자의 임계온도인 125°C를 기준으로 반도체 물성을 기반해 나온 수식의 I-V특성을 통해 계산하였다. 같은 조건에서 수치해석적 방법을 통한 도통손실 및 스위칭 손실의 합을 구해 측정된 손실과 비교하여 나타내보면 그림 3과 같다.

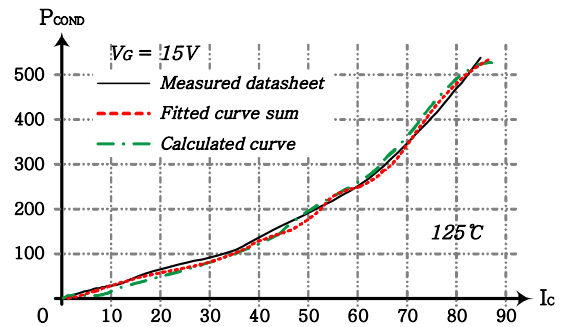


그림 3 손실계산 결과 비교

## 3. 결론

본 논문에서는 반도체 스위칭 소자의 다양한 손실계산 방법에 대하여 논하였다. 이중 보편적인 두 방법을 IGBT모듈에 적용시켜 손실을 계산하고 그 결과를 보였다. 이 방법들은 전력전자회로에 적용시켜 손쉽게 손실 및 효율해석이 가능하다.

## 참고 문헌

- [1] U. Drofenik and J. W. Kolar, "A General Scheme for Calculating- and Conduction-Losses of Power Semiconductors in Numerical Circuit Simulations of Power Electronic System", International Power Electronics Conference(IPEC), Niigata, Japan, April, 2005.
- [2] Santi, E., Caiafa, A., Kang, X., Hudgins, J.L., Palmer, P.R., "Temperature effects on trench-gate IGBTs", IEEE Industry Applications Conference(IAS), vol.3, pp. 1931 - 1937, 2001.