

# 턴 온 상태를 고려한 NPT IGBT의 과도 특성 모델링

류세환, 이용국, 안형근, 한득영  
건국대학교 전기공학과

## Modeling transient characteristics of NPT IGBT including trun-on condition

Sehwan Ryu, Yongkuk Lee, Hyoung-Keun Ahn, and Deuk-Young Han  
Konkuk Univ.

### Abstract

In this work, current-voltage characteristics with time of NPT(Non-PunchThrough) IGBT is proposed during trun-on and turn-off by using analytical method. From the results, power loss at trun-off dominates the total electrical loss with respect to that at turn-on.

The results have been compared with those of PSPICE and show the identical trend of power loss with each other.

**Key Words** : transient, NPT(Non-PunchThrough), IGBT, analytical method, turn-on

### 1. 서 론

전력용 반도체로서 각광을 받고 있는 IGBT는 현재 많은 산업 현장에서 사용되고 있다. 고전력 스위칭 소자로 전력용 BJT의 대부분의 자리를 대체하고 있는 실정이고, 전력용 MOSFET 영역까지 그 사용 범위가 넓어지고 있다. 이러한 IGBT에 관한 연구는 매우 활발하게 이루어져 오고 있고, 특히 과도 상태 중 턴-오프 특성에 관해서 많은 연구가 진행되어 왔다. 반면에 턴-온 특성에 관한 연구는 미비한 상황이다. 실제적으로 턴-오프 시 발생하는 스위칭 전력손실이 많기 때문에 연구의 비중이 오프 때의 과도 상태 해석에 치중되어 있었다[1][2]. 하지만 전체적인 스위칭 에너지 손실을 구하기 위해서는 턴-오프 뿐만 아니라 턴-온 특성을 해석하는 것이 중요하다 사료되어 본 논문에서 그 특성을 연구하였다.

턴-오프 때의 해석과 마찬가지로 IGBT의 BJT 부분에서 베이스와 컬렉터의 공핍층에서의 변위 전류 항목을 이용해서 턴-온 특성을 해석하였다. 턴-오프인 경우 베이스-컬렉터 공핍층에서의 변위 전류와 베이스 영역에 축적된 전하량이 같다고 보고 그 변화를 통해 과도 상태 시 시간 변화에 따른 베이스-컬렉터 전압강하 식을 해석적으로 제시

하였고[3], 턴-온 경우도 마찬가지로 공핍층에 주입되는 전하들에 의해 제거되는 현상을 공핍영역이 감소하고 그 시간이 결국 정상 상태 전류에 이르는 과도 시간으로 해석하고 이를 토대로 IGBT에 걸리는 전압 변화를 나타내었다.

본 논문에서는 NPT IGBT의 물리적 파라미터를 이용하여 턴-온 시 발생하는 과잉 캐리어와 전하량을 해석하고 이를 이용하여 전압-전류 파형을 해석적으로 제시하였다. 각각의 전류-전압 파형은 수명시간에 따라서 나타내었고, 턴 오프 인 경우 수명시간에 따라 정상시간 도달시간이 달라지는 반면 턴 온에서는 그리 큰 영향을 미치지 않았다. 또한 턴 온에서 발생하는 스위칭 에너지 손실이 턴 오프 보다는 적게 나타나 과도 상태 시 턴 오프 스위칭 손실이 지배적이라는 것알 알 수 있었다. 이러한 결과는 PSPICE와 비교해서 그 타당성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 정상 상태의 IGBT 모델

그림 1은 NPT IGBT의 기본적인 구조를 나타내고 있다. turn-on 이후 MOSFET 부분의 전자 전류가 유입되면 IGBT의 쌍극성 접합 트랜지스터(BJT) 부분의 베이스 전류로서 작용하고 IGBT는

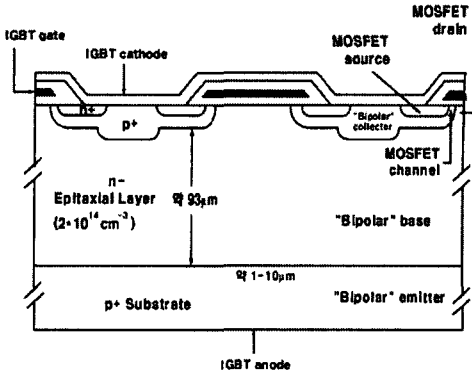


그림 1. NPT-IGBT의 구조[1].

동작하게 된다. 이러한 현상 때문에 turn-on 현상은 MOSFET 부분의 전자 전류를 같이 고려해야만 한다. NPT IGBT의 MOSFET 부분은 주로 on/off 제어에서만 관여하고, turn-on 시 베이스 전류로서 나타나는 채널 충을 통한 전자 전류가 증가하는 것을 시간에 따라 해석하였고, 또한 에미터로 주입되는 과잉 캐리어에 의해 off 상태 시 증가했던 베이스-컬렉터 공핍 영역이 줄어들게 될 것이고, 이러한 현상은 BJT 부분을 고려해서 해석하였다. 해석 시 IGBT의 BJT부분은 고준위 주입으로 고려하고, ambipolar 전송[4]을 고려하였다.

$$I_B = I_{mos} = K_p (V_{gs} - V_T) V_{ds} \quad (1)$$

식 (1)는 MOSFET의 채널 전류를 나타내고 이 전류가 정상 상태 시 베이스 전류로 주어진다. 여기서  $K_p$ 는 MOSFET 채널 컨덕턴스를 나타내고, 이것은 산화막 커패시턴스, 표면 전자 이동도, 채널의 길이와 폭의 비의 곱으로 나타낸다[5].

턴 온 시 주입되는 과잉 소수 캐리어 농도는 소수 캐리어 확산방정식을 이용해서 구하게 된다. 이것은 식 (2)에서 보여주고 있다[3].

$$\frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} = \frac{\delta p}{L^2} + \frac{1}{D} \frac{\partial \delta p}{\partial t} \quad (2)$$

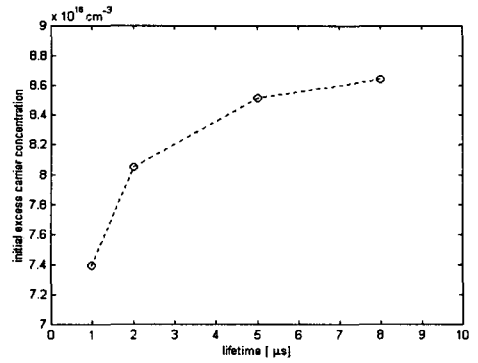


그림 2. 수명시간에 따른 초기 과잉 소수 캐리어 농도.

여기서  $\delta p$ 는 과잉 소수 캐리어이고,  $L$ 은 캐리어의 확산길이,  $D$ 는 앰비폴러 확산계수를 나타낸다. 확산길이  $L$ 이 수명시간에 대한 함수로 주어지고 수명시간이 변화하면 주입되는 과잉 소수 캐리어가 변화하게 된다. 식 (2)을 풀게 되면  $\delta p$ 을 구할 수 있는데 정상 상태 일 때의 N-drift로 주입되는 과잉 소수캐리어는 다음과 같다[7].

$$\delta p(x) = P_0 \frac{\sinh[(W-x)/L]}{\sinh(W/L)} \quad (3)$$

여기서  $W$ 는

$$W = W_B - W_{bcj} \quad (4)$$

로 나타내고, 실제 베이스 영역을 나타낸다.  $W_B$ 는 전체 베이스 영역을 나타내고  $W_{bcj}$ 는 컬렉터와 베이스 온 시에서는 그리 큰 영향을 받지 않으나 턴 오프 시에는 애노드 전압 강하에 의해 급격하게 변화하게 된다.

과잉 소수 캐리어에서  $P_0$ 는 N-drift 영역과 BJT 부분의 Emitter 부분과의 경계면에서 초기 과잉 소수 캐리어 값이다. 이 값은 식 (4)에서와 같이 나타내고 그림 2에서 수명시간에 따른 변화값을 나타내고 있다.

## 2.2 과도 상태의 IGBT 모델

과도 상태 시 BJT 부분의 베이스와 컬렉터 영역의 공핍층은 턴-오프 시에는 급격하게 증가하게 되고, 턴-온 시에는 전하량 유입에 따라 줄어들게

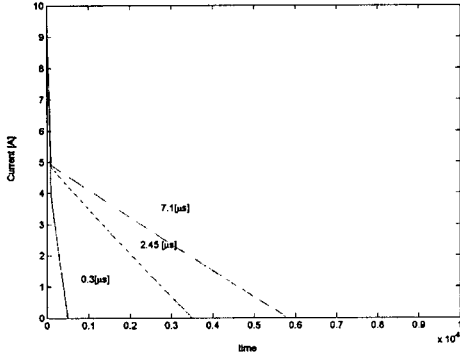


그림 3. 턴 오프 시 수명시간에 따른 애노드 전류의 변화.

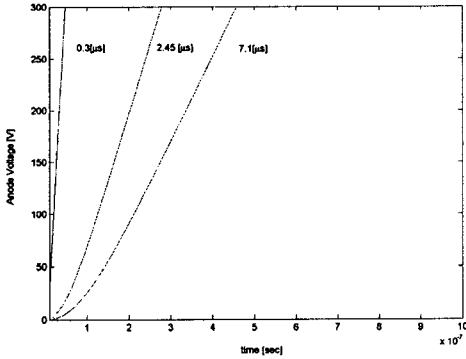


그림 4. 턴 오프 시 수명시간에 따른 애노드 전압 강하의 변화.

된다. 공핍층은 소자에 걸리는 애노드 전압 강하에 의해 변화하게 되는데 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$W_{bcj} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_{si} V_A(t)}{qN_B}} \quad (5)$$

과도 상태일 때는 전압에 따른 공핍층이 변화함으로써 경계 조건이 변화하게 되는데 경계 조건이 변화하게 되면 과잉 소수 캐리어에 대한 식을 유

도할 때 시간에 대한 항을 추가해야 되고, 전압 변화에 따라 주입된 과잉 소수 캐리어도 급격하게 감소하게 된다[8].

식 (6)은 과도 상태 시 N-drift 영역에 축적된 전하량을 해석적으로 나타낸 식으로 수명시간과 과도 시간에 대한 함수로 주어졌다.

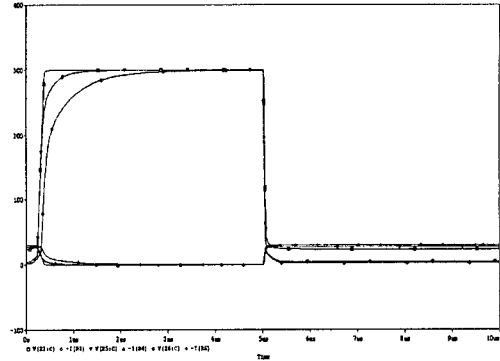


그림 5. Pspice를 이용한 과도 상태 전류-전압 파형.

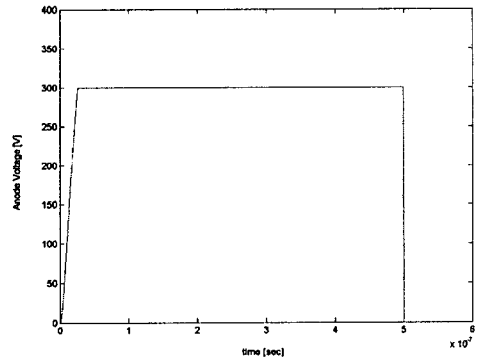


그림 6. 수명시간이 0.3[μs]일 때의 과도 상태 애노드 전압 강하.

$$Q_i(t) = [qP_0AL \tanh(W/2L)](1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (6)$$

식 (6)은 턴 온 시의 축적되는 전하량을 나타내는 식으로 수명시간에 따라 축적되는 시간이 지연됨을 알 수 있었다.

$$V_A(t) = \frac{R_B^2 - 2tR_A R_C - R_B \cdot \sqrt{R_B^2 - 4tR_A R_C}}{2R_A^2} \quad (7)$$

여기서

$$R_A = R(R \cdot t \cdot I_T + R_r \cdot Q_t)$$

$$R_B = W_B(2R \cdot t \cdot I_T + R_r \cdot Q_t)$$

$$R_C = W_B^2 \cdot I_T - 4D_p \cdot Q_t$$

$$R_r = (A\epsilon_{si}(1+1/b))/(3qAN_B R)$$

식 (7)은 시간에 따른 애노드 전압강하의 식으로 전하량의 식을 이용하게 되면 과도 상태시 전압 변화를 나타낼 수 있다[3].

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 턴 오프 시 애노드 전류의 변화를 수명시간에 따라 나타낸 것이다. 수명시간이 증가할수록 애노드 전류의 소멸 시간이 길어짐을 알 수가 있다.

그림 4는 턴 오프 시 NPT IGBT에 걸리는 애노드 전압 강하를 수명시간을 0.3[ $\mu$ s], 2.45[ $\mu$ s], 7.1[ $\mu$ s]로 변화시켜 나타낸 것이다. 수명시간이 길어질수록 전압의 상승 시간이 길어짐을 알 수 있었다.

그림 5는 Pspice를 이용해서 과도 상태 시 전류-전압 파형을 나타내고 있다. 턴 오프 시에는 수명시간에 따라 전압 파형의 정상 상태 시간이 증가함을 보여주고 있고, 턴 온 시에는 수명시간의 변화에도 불구하고 파형의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

그림 6은 수명시간을 0.3[ $\mu$ s]으로 주어졌을 때 과도 상태 시 애노드 전압 강하 파형을 보여 주고 있다. 오프 시에는 어느 정도 증가 시간이 있지만 온 시에는 매우 급격하게 전압이 감소함을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 NPT IGBT의 과도 상태 시의 전압-전류 파형을 수명시간에 따라 나타내었다. 턴 오프 시에는 수명시간이 길어질수록 전류가 제거되는 시간이 커짐을 알 수 있었고, 전압 또한 정상 상태 까지 도달하는 시간이 커짐을 알 수 있었다. 턴 온 시에는 수명시간에 그리 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났고, 매우 급격하게 파형이 변화하였다. 이는 과도 상태 해석에서 수명시간이 길어질수록 턴-오프 시 발생하는 스위칭 에너지 손실이 턴 온 시보다 훨씬 많이 증가함을 의미하고, 이

것이 턴 오프에 관련된 해석이 많은 이유이다.

본 논문에서 제시되는 모델을 기반으로 NPT IGBT의 과도 상태를 해석적으로 나타낼 수 있을 리가 사료되고 이를 토대로 IGBT의 과도 상태 시 발생하는 스위칭 에너지 손실을 정확하게 예측할 수 있을거라 생각된다. 또한 온도 특성을 관한 부분을 추가하면 스위칭 시 열을 많이 발생하는 IGBT의 열 특성 해석에도 기본 모델로 제시될 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] Allen R. Hefner, David L. Blackburn, "An Analytical Model for the Steady-State and Transient Characteristics of the Power Insulated Gate Bipolar Transistor," *Solid-State Electronics*, Vol.31, No. 10, pp. 1513-1532, 1988.
- [2] Malay Trivedi and Krishna Shenai, "Investigation of the Short-Circuit Performance of an IGBT", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 45, No. 1, Jan. 1998.
- [3] Se-Hwan Ryu/Hyung-Keun Ahn/Deuk-Yong Han, "An analytical Transient Model for NPT IGBT", ICPE'01, pp 26-30, 10, October, 2001
- [4] Donald A. Neaman, *Semiconductor Physics and Devices*, IRWIN, pp 176-181, 1997.
- [5] Allen R. Hefner, "Analytical Modeling of Device-Circuit Interactions for the Power Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT)", *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 26, No. 6, No v./Dec. 1990.
- [6] Robert F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, pp. 75-148, 1996.
- [7] Allen R. Hefner, "An Improved Understanding for the Transient Operation of the Power Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT)", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 5, No.4, Oct. 1990.
- [8] K. Sheng, F. Udrea, G.A.J. Amaratunga, "Optimum carrier distribution of the IGBT", *Solid-State Electronics*, Vol. 44, pp.1574-1583, 2000.