

미시적인 IGBT소자 모델링과 회로동작 시뮬레이션

서영수* 백동현** 임영배*** 김영춘* 조문택* 서수호*

* 명지대학교 공과대학 전기공학과 ** 경원전문대학 *** 충남전문대학 전기과

Micro IGBT Device Modeling and Circuit Simulation

Young-Soo Seo* Dong-Hyun Baek** Young-Bae Lim*** Young-Chun Kim* Moon-Taek Cho* Soo-Ho Seo*

* Myong-Ji University ** Kyung Won Junior College *** Chung Nam Junior College

Abstract

IGBT devices have the best features of both power MOSFETs and power bipolar transistors, i.e., efficient voltage gate drive requirements and high current density capability.

The interaction of the IGBT with the load circuit can be described using the device model and the state equation of the load circuit.

The protection circuit requirements are unique for the IGBT and can be examined using the model.

I. 서론

IGBT의 바이폴라 트랜지스터는 베이스의 컬렉터 끝 가까이에 있는 베이스 가상접촉(MOSFET 드레인)을 가지고 얇게 도핑된 베이스로 구성된다. 이러한 바이폴라 트랜지스터는 IGBT의 실제적인 전류범위에 대한 고-레벨 주입조건에서 낮은 이득을 가진다. IGBT의 MOSFET부분은 얇게 도핑된 에피타살 층의 저항이 바이폴라 트랜지스터의 전도율-변조 베이스 저항으로 대체되는 것을 제외하고는, 구조적으로 등가인 전력용 VDMOSFET와 유사하게 동작한다.

본 논문에서는 미시적인 IGBT소자 모델로 턴-온과 턴-오프시 전압 전류특성과 일반적인 부하 조건에서 IGBT의 과도전류와 전압 파형을 정확하게 시뮬레이션 했으며, 스너버 보호회로, 병렬로 구성된 IGBT에 대해 전압과 전류의 스위칭 과도파형을 시뮬레이션하기 위해 부하상태 방정식을 이용했다.

II. 미시적인 IGBT소자 모델링

미시적인 IGBT모델로 구동회로와 부하회로를 포함하여 IGBT동작을 나타냈다. IGBT모델은 베이스-컬렉터 전압 V_{bc} , 베이스전하 Q , 게이트-소스전압 V_{gs} 에 대한 3개의 상태방정식으로 나타났다. 이들 상태방정식은 IGBT와 외부회로 상태변수의 순시적인 값에 대한 함수항으로 표현된다.

III. 외부회로와의 관계

적용회로에서 IGBT의 다이내믹 동작을 시뮬레이션하기 위해, IGBT상태방정식은 외부회로의 상태방정식과 결합을 해야한다. 시스템의 상태변수는 IGBT(Q, V_{gs}, V_{bc})와 외부회로의 상태변수로 구성된다. 일반적으로, IGBT의 게이트와 애노드 전류, 인덕터 전압, 커패시터 전류에 대한 표현은 시스템의 상태변수를 알고 있다고 가정할때 키르히호프의 전압과 전류법칙을 적용하여 구할 수 있다.

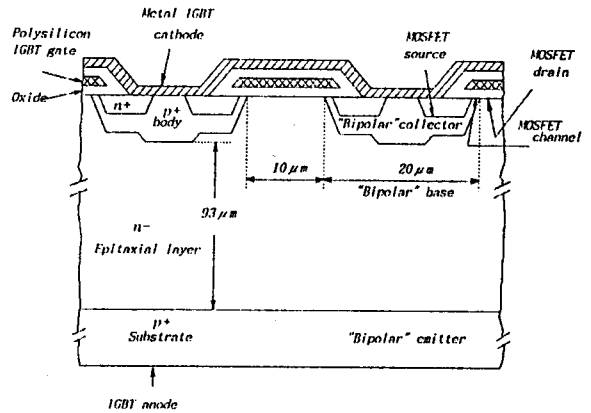


그림 1. n-채널 IGBT의 확산 셀 다이어그램

III-1. 직렬 저항-인덕터 부하

그림 2의 회로에 대한 부하회로 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} (V_{AA} - R_L \cdot I_L - V_A) \quad (1)$$

이 회로에서 $I_T = I_L$ 이고, 애노드 전압 V_A 와 에미터 베이스전압 V_{eb} , 게이트전류 I_g 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_A = V_{eb} + V_{bc} + I_T \cdot R_b$$

$$V_{eb} = V_{eb0}(V_{bc}, Q) + I_T \cdot R_b(V_{bc}, Q) \quad (2)$$

$$I_g = \frac{V_{gs} - V_{gs0}}{R_g}$$

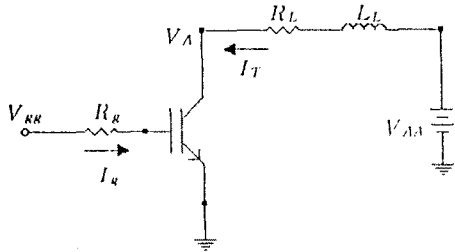


그림 2. 직렬 저항-인덕터와 저항성 게이트구동 회로를 소자변환으로 나타낸 회로도.

III-2. 피드백 스너버회로

그림 3은 직렬 저항-인덕터부하, 게이트 구동저항 그리고 직렬 저항-캐패시터 외부 피드백회로를 가진 IGBT 에 대한 회로도이다. 이러한 보호회로에 대해, 외부 피드백 캐패시터 \$V_d\$에 걸리는 전압에 대한 부가적인 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I_f}{C_f} \quad (3)$$

여기서, 피드백 전류는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_f = \frac{V_A - V_{ce} - V_{ce}}{R_f} \quad (4)$$

이러한 회로에서 IGBT 애노드 전류는 \$I_T = I_L - I_f\$로 주어지며, 게이트 전류 \$I_g\$는 다음 식과 같다.

$$I_g = \begin{cases} I_f + \frac{(V_{RR} - V_{ce})}{R_g} & V_{RR} < V_{ce} + V_{ce} \\ I_f + \frac{(V_{RR} - V_{ce})}{R_g} + \frac{(V_{RR} - V_{ce} - V_{ce})}{R_{gen}} & V_{RR} \geq V_{ce} + V_{ce} \end{cases} \quad (5)$$

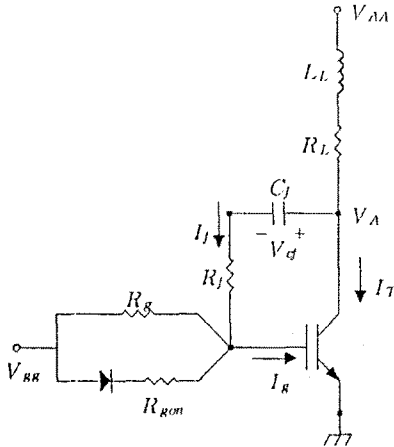


그림 3. 직렬 저항-인덕터 부하, 게이트 드라이브 저항 그리고 직렬 저항-캐패시터 피드백 회로를 가진 IGBT의 회로도.

III-3. 병렬로된 IGBT 회로

IGBT의 애노드 전압과 전류는 다음 식으로 주어진다.

$$V_A = \left(I_L + \frac{V_{bc1} + V_{cb1}}{R_{b1}} + \frac{V_{bc2} + V_{cb2}}{R_{b2}} \right) \frac{R_{b1} \cdot R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \quad (6)$$

$$I_{T1} = \frac{V_A - V_{bc1} - V_{cb1}}{R_{b1}} \quad (7)$$

$$I_{T2} = \frac{V_A - V_{bc2} - V_{cb2}}{R_{b2}}$$

또한, IGBT 게이트 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{g1} = \frac{V_{RR} - V_{ce1}}{R_{g1}} \quad (8)$$

$$I_{g2} = \frac{V_{RR} - V_{ce2}}{R_{g2}}$$

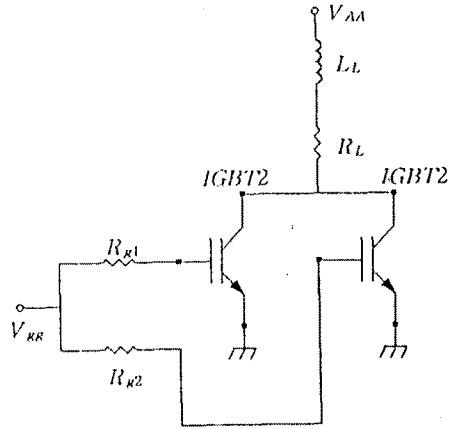


그림 4. 공통 직렬 저항-인덕터 부하와 분리된 저항성 게이트 회로를 가진 2개의 병렬로 된 IGBT의 회로도.

IV. 시뮬레이션 결과

IGBT의 파라미터값을 기준으로 하여, 베이스의 lifetime과 물리적인 파라미터, 부하회로 조건 (\$R_L, L_L\$), 게이트 구동 저항 (\$R_g\$)의 값등을 가변하여 IGBT의 애노드 전압, 전류, 게이트 전압, 전류를 시뮬레이션하였다.

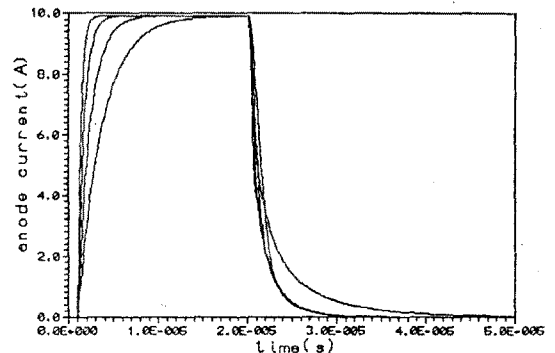
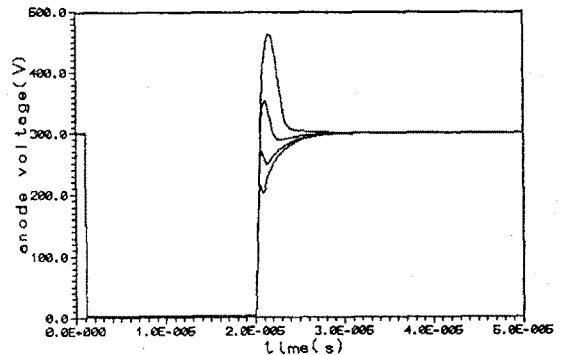


그림 5. \$2.4[\mu s]\$ 소자와 \$10 \sim 80[\mu H]\$의 인덕턴스에 대한 애노드 전압 전류파형.

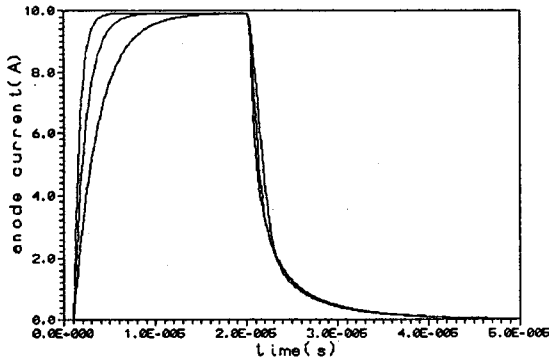
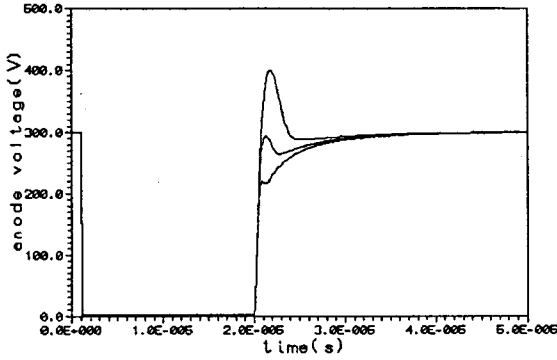


그림 6. 7.1[μ s]소자와 20~80[μ H]의 인덕턴스에 대한 애노드 전압 전류파형.

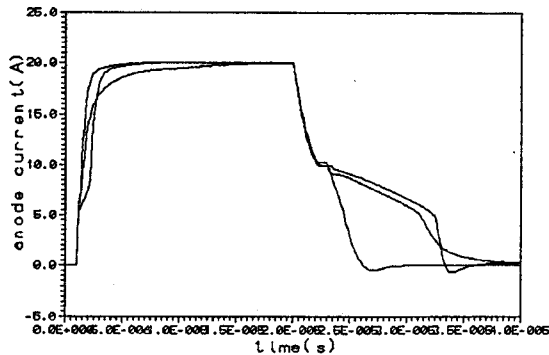
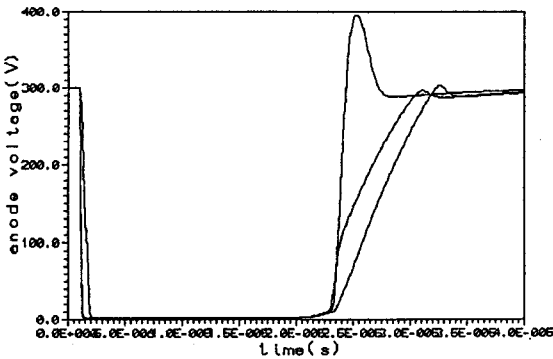


그림 7. 피드백회로에서 C_{gd} 가변에 대한 애노드전압 전류파형.

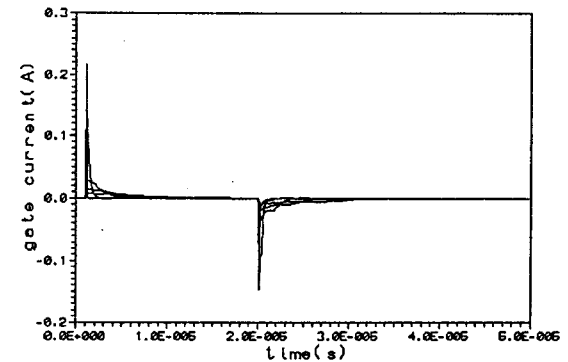
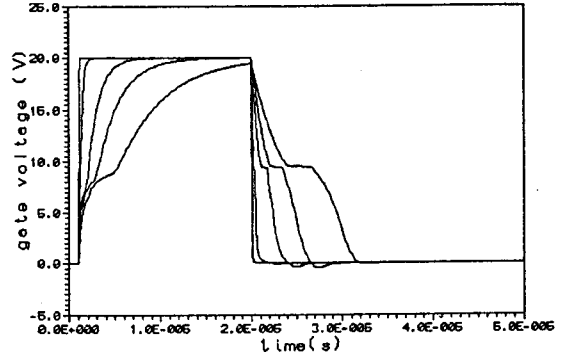


그림 8. 서로다른 게이트저항값에 대한 게이트 전압과 전류파형.

V. 결 론

미시적인 IGBT소자 모델로 일반적인 외부동회로, 부하회로 그리고 피드백 회로, 병렬로 연결된 회로에 대한 턴-온과 턴-오프, 게이트, 애노드 전압·전류를 시뮬레이션했다.

턴-오프시 유도성 부하에서 전압 상승률은 IGBT의 t_{if} 에 따라 가변되었고, 이러한 상승률은 오버슈트 전압을 결정하는데 중요한 역할을 하며, 이러한 오버슈트 전압으로 인해 스너버 보호회로가 요구된다. 스너버 보호회로의 파라미터들은 IGBT의 모델을 사용한 시뮬레이션을 통해 결정할 수 있었다.

참고문헌

- [1] A.R.Hefner and D.L.Blackbun, "An Analytical model for the steady-state and transient characteristics of the power insulated gate bipolar transistor," *Solid-State Electronics*, vol. 31, pp.1531,1988.
- [2] J. P. Russell, A.M.Goodman, L.A.Goodman, and J.M. Neilson, "The COMFET-A new high conductance MOS-gated devices," *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. EDL-4, pp. 63, 1983.
- [3] 서영수, 장성철, 김영춘, 조문택, 서수호, "과도해석 시뮬레이션을 위한 IGBT소자의 논리적인 모델링," *추계학술대회 논문집*, 1993.