

IGBT 기반 인덕턴스 및 문턱전압 변화에 따른 초퍼 회로의 연구

A Study on Chopper Circuit for Variation of Inductance and Threshold Voltage based on IGBT

노영환†

Young Hwan Lho

Abstract The development of high voltage Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) have given new device advantage in the areas where they compete with conventional GTO (Gate Turnoff Thyristor) technology. The IGBT combines the advantages of a power MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) and a bipolar power transistor. The change of electrical characteristics for IGBT is mainly coming from the change of characteristics of MOSFET at the input gate and the PNP transistors at the output. The change of threshold voltage, which is one of the important design parameters, is brought by charge trapping at the gate oxide under the environment that radiation exists. The energy loss will be also studied as the inductance values are changed. In this paper, the electrical characteristics are simulated by SPICE, and compared for variation of inductance and threshold voltage based on IGBT.

Keywords : IGBT, Energy loss, Threshold voltage, Inductive chopper circuit, Turn-off switch

초 록 고전압 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터 (IGBT)의 개발로 기존의 GTO(Gate Turnoff Thyristor)가 적용되는 분야에서 더 효율적인 새로운 소자로 인정받고 있다. IGBT는 금속 산화막 반도체 트랜지스터(MOSFET)와 바이폴라 전력 트랜지스터의 장점을 결합한 소자이다. IGBT의 전기적 특성의 변화는 주로 입력단자에 MOSFET와 출력단자에 PNP 트랜지스터의 특성에 달려있다. IGBT의 가장 중요한 설계변수중의 하나인 문턱전압의 변화는 방사선이 존재하는 환경에 게이트 산화막(oxide)에서 전하포획(charge trapping)에 의해 발생되고 에너지 손실을 야기시킨다. 또한, 에너지 손실은 초퍼회로의 인덕턴스 값이 변화될 때 발생됨을 연구한다. 본 논문에서 IGBT의 전기적 특성을 SPICE로 시뮬레이션하고, IGBT 기반 인덕턴스와 문턱전압의 변화에 따른 전기적 특성을 분석하고자 한다.

주요어 : IGBT, 에너지 손실, 문턱전압, 초퍼회로, 턴-오프 스위치

1. 서 론

전력소자의 경우 MOSFET와 GTO에 대해 많은 연구를 해왔고 산업현장에서 많이 사용되어 왔는데, 최근들어 IGBT는 회로가 간단하고 전력소모가 적은점 등 다른 전력소자보다 장점이 많아 최근 여러 분야에서 적용되고 있다. IGBT는 MOSFET의 빠른 스위칭 특성과 BJT(Bipolar Junction Transistor)의 고전류 구동 능력을 결합시킨 소자로 MOS 게이트를 사용하여 구동하기 때문에 전력용 바이폴라 트랜지스터와 비교할 때 구동회로가 간단하고, 전력용량도 커서 최근에 고 전력 시스템에서 바이폴라 트랜지스터를 대체하는 소자로 많은 각광을 받고 있다[1]. 그리고 IGBT는 낮은 턴-온(turn-on) 상태에서 전도 손실과 큰 항복전압을 가지고 있는 BJT와 빠른 스위칭 속도와 전 전력 손실을 가지는 MOSFET의 장점을 이용하여 결합시킨 전력소자이다.

BJT는 스위칭 속도의 제한이 있고, MOSFET는 동작속도

는 BJT에 비해 빠르지만 동작전압이 200~300V 정도로 제한되고 동작 전류의 크기에도 제한이 따른다. MOSFET에서 문턱전압(threshold voltage)의 변화[2,3]는 게이트 산화막에 전하포획에 의해 발생되는데, 문턱전압은 IGBT의 중요한 설계변수 중에 하나이다. IGBT를 기반으로 인덕터를 포함한 부하회로에서 인덕턴스 값의 변화와 IGBT의 문턱전압의 변화에 따른 에너지 손실에 대한 연구가 필요하다.

2. 전기적 특성

IGBT 소자의 동작에 있어 도통 및 차단 스위칭은 MOSFET의 원리를 이용하며 MOSFET의 드레인에 해당하는 콜렉터 전류의 공급에서는 소수의 캐리어 주입이 일어난다. 이때 주입된 소수 캐리어의 작용으로 소자의 턴-오프(turn-off) 동작에서 시간 지연이 일어나게 되고, 턴-오프는 V_{GE} (게이트 전압)이 V_{th} (문턱전압)보다 낮을 때 일어나며, 이때 에너지 손실이 발생된다.

2.1 IGBT의 구조 및 동작원리

Fig. 1은 IGBT의 단면을 나타낸 것이다. IGBT는 상부의 MOSFET 부분과 하부의 BJT 부분[1,4]으로 구성되어 있다. 소자의 도통 및 차단 상태의 스위칭 동작은 상부의 MOSFET 부분에서 이루어지며 에미터(N+)가 MOSFET의 소스로 작용하고, 베이스(P-) 영역이 채널로, 드리프트(N-)영역이 드레인으로 작동하는 구조이다. 소자가 도통되면 하부 콜렉터(P+)와 드리프트(N-)가 순 바이어스 되어 있으므로 콜렉터로부터 정공(hole)이 드리프트영역으로 주입되어 소수 캐리어로 작동한다. 소수 캐리어 농도가 증가하면 전하 균형을 이루기 위하여 에미터(N+) 영역으로부터 드리프트(N-) 영역으로 더욱 많은 전자가 주입된다.

Fig. 1의 IGBT의 동작은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 1단계: 턴-오프 상태

콜렉터에 전압이 인가되면 J2(접합면2)은 순방향 바이어스이고, 게이트와 에미터가 공통으로 묶여있을 때 J1은 역방향 바이어스가 된다. 이때 전류는 컷오프 되고, 이때를 턴-오프 상태라 한다.

2) 2단계: 턴-오프에서 턴-온 상태변화

만약 V_{GE} 가 문턱전압보다 크면 전자는 P영역의 표면에서 발생된 채널을 통해 베이스 영역으로 공급되어 진다. 이때 전류는 트랜지스터에서 순방향으로 흐른다.

3) 3단계: 턴-온 상태

콜렉터 전압이 증가될 때, 정공은 P+ 기판으로부터 N- 영역으로 주입되고 N-층의 전도율은 증가되어 저항 감소를 가져온다. 이때 스위치는 턴-온 상태로 된다.

4) 4단계: 턴-온에서 턴-오프 상태변화

게이트와 에미터의 단락은 IGBT를 턴-오프시키며, P+ 계층의 채널은 급격하게 사라지게 된다. N계층에는 정공과 전자가 존재한다. 이때 전자는 기판(substrate)안으로 주입되어 지고 정공의 P+계층으로 각각 이동되어 진다. 남아있는 전자와 정공은 재결합을 통해 감소되며, IGBT는 스위칭 동작을 통해 턴-오프 상태로 바뀐다. 이러한 동작은 1단계부터 반복된다.

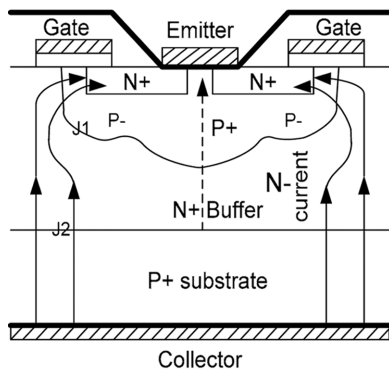


Fig. 1 IGBT의 등가회로

2.2 SPICE모델

IGBT의 전기적 특성[3,5]을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 SPICE 모델[6,7]을 설계한 후 T1과 T2의 변수는 Table 1과 같이 설정하였다. 이 모델은 중요한 부분만을 고려하여 구성되었으며, 입력단은 MOSFET의 게이트이고 출력단은 트랜지스터의 콜렉터단자로 구성된다.

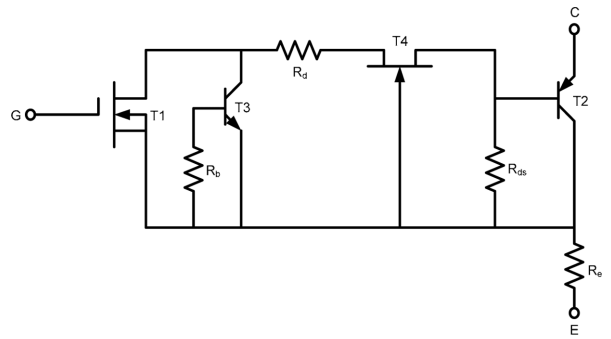


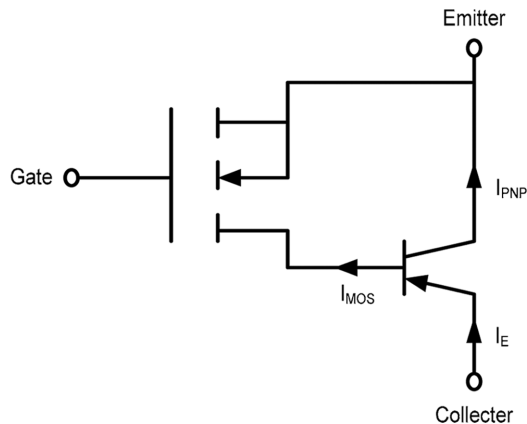
Fig. 2 IGBT의 등가회로

Table 1 T1, T2의 SPICE 변수

변수(MOS)	값	변수(BJT)	값
LEVEL	1	IS	10^{-16}
VTO	6.5	BF(β)	10
KP	0.5	NE	2

Table 1에서 LEVEL 1은 MOSFET SPICE 모델의 종류이며, VTO는 초기 문턱전압을 의미하고, KP는 MOS의 순방향 전도도(trans-conductance)이며, IS는 포화전류를, NE는 Bipolar 트랜지스터의 베이스-에미터 누설방출계수(base-emitter leakage emission coefficient)를 나타내며, BF는 순방향 전류 이득을 나타낸다.

모터의 구동은 IGBT의 고전류 스위칭에 의해 실행된다[8]. IGBT의 턴-오프는 V_{GE} 가 문턱전압보다 낮을 때 발생된다. 대부분의 게이트의 방전된 전류 (I_C)는 $C_{GC} \frac{dV_{GE}}{dt}$ 이며, 게이트 전압은 일정하게 유지된다. V_{GE} 가 문턱전압보다 적어질 때



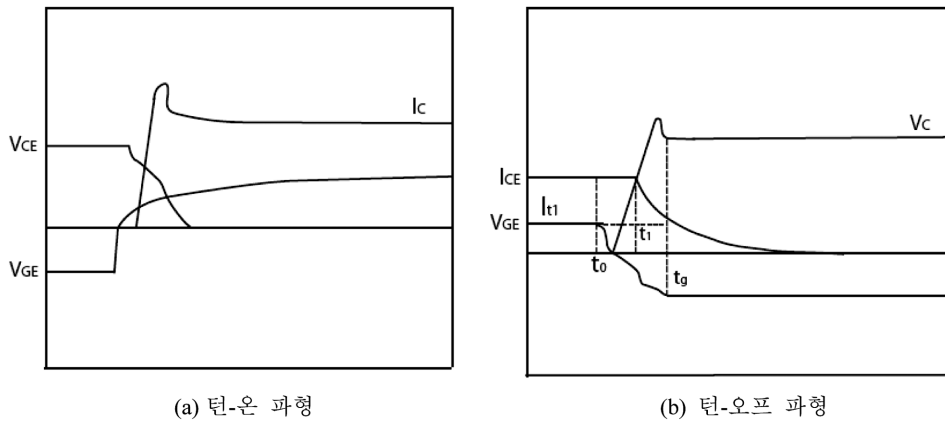


Fig. 3 IGBT의 전류 및 전압 파형

콜렉터 전류 I_C 는 턴-오프의 상태로 흐르지 않는다. 반대로 V_{GE} 가 문턱전압보다 높을 때 같은 동작원리로 IGBT는 턴-온 된다. 에너지 손실은 IGBT가 턴-온 상태에서 전도손실 (conduction loss)과 턴-온 상태에서 턴-오프 상태로 스위칭 될 때 발생하는 스위칭 손실 (switching loss)로 나누어진다. 문턱전압에 따른 턴-온시의 전력손실, 즉 전도손실은 문턱 전압이 감소함으로써 줄어든다. 전도 손실은 등식(1)과 같이 표현된다.

$$E_{on} = V_{CE} \times I_C \quad (1)$$

여기서 V_{CE} 는 턴-온시 콜렉터 전류와 턴-온 저항의 곱 ($I_C \times R_{on}$)을 나타낸다. 스위칭 손실은 턴-온과 턴-오프시 동일한 동작전류와 전압으로 가정하고 평균 스위칭 손실은 등식 (2)와 같다.

$$E_{sw} = f_{sw}(E_{sw}(on) + E_{sw}(off)) \quad (2)$$

여기서 f_{sw} 는 스위칭 주파수, $E_{sw}(on)$ 과 $E_{sw}(off)$ 는 턴-온과 턴-오프시 각각의 스위칭 손실이다. 턴-온시 인덕턴스에 저장된 에너지가 턴-오프시 에너지가 소모되어야 하므로 턴-오프시 에너지 손실이 상대적으로 턴-온시 에너지 소모보다 크다. 스위칭 손실은 주파수에 비례하므로 전체 손실 중 저 주파수에서 전도손실에 비해 스위칭 손실은 상대적으로 적다. 부하인덕턴스 값에 따라 영향을 받은 부하 손실은 등식 (3)과 같다.

$$E_L = \frac{1}{2} L I_c^2 \quad (3)$$

Fig. 3(a)와 (b)는 IGBT가 턴-온과 턴-오프시 각각의 전압 및 전류를 보여주고 있고, Fig. 3 (b)에서 IGBT가 턴-오프 시에 천이특성으로 전류가 선형적으로 감소됨을 보여주고 있다.

방사선에 노출되는 응용회로를 구성할 때 IGBT의 문턱전압의 감소는 턴-온 저항의 감소를 초래한다. 이때 저항은 IGBT가 포화영역에서 동작할 때 문턱전압과의 관계[9]는 등

식(4)와 같다.

$$R_{on} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{2V_{DS}}{K_p \beta_p (V_{GS} - V_T)^2} \quad (4)$$

3. 시뮬레이션

IGBT를 기반으로 인덕터를 포함한 부하회로에서 인덕턴스 값의 변화와 IGBT의 문턱전압의 변화에 따른 에너지 손실에 대한 연구를 하기 위해 입력은 10V이고 V_{CC} 는 300V로 설정하고, 역방향 회복을 개선하기 위한 다이오드를 역방향으로 부착한 초퍼 회로를 Fig. 4와 같이 구성한다.

Fig. 3(b)와 같이 IGBT의 턴-오프시 전류 I_C 는 IGBT내부의 기생 캐패시터 (parasitic capacitor)에 전달되어 캐패시터 양단에 전압을 증가시킨다. 이때 전류 I_C 는 스위칭 전압이 동시에 증가될 때 감소하기 시작한다. 전류[10]는 등식(5)와 같다.

$$I_c = I_o - \frac{I_o - I_{tl}}{t_f}(t - t_1) \quad (5)$$

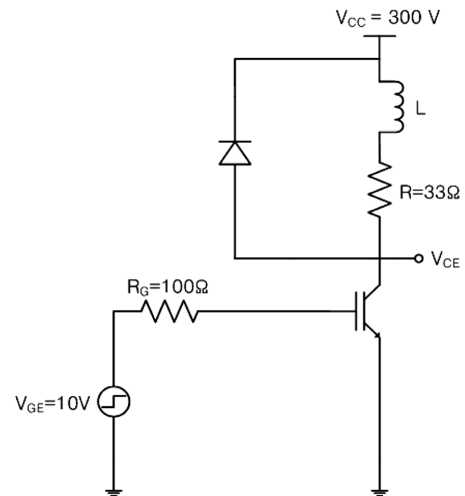


Fig. 4 IGBT 초퍼 회로

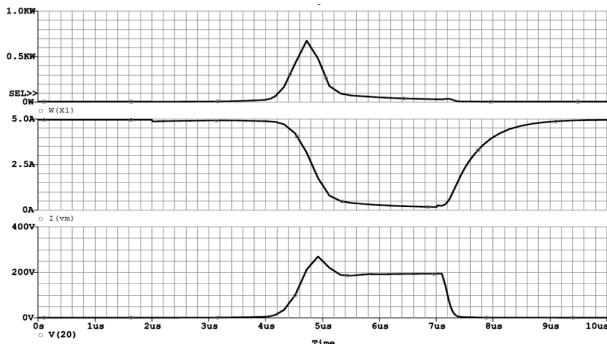


Fig. 5 L = 20µH에서 전력손실, I_C , V_{CE}

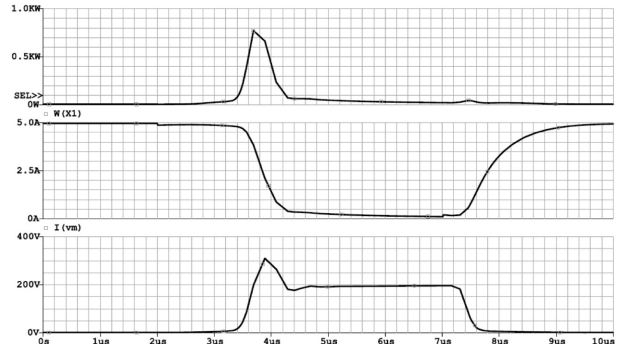


Fig. 7 L = 20µH과 $V_{th} = 4.85V$ 에서 전력손실, I_C , V_{CE}

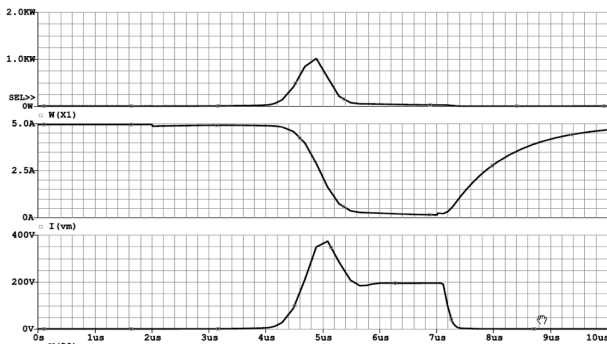


Fig. 6 L = 40µH에서 전력손실, I_C , V_{CE}

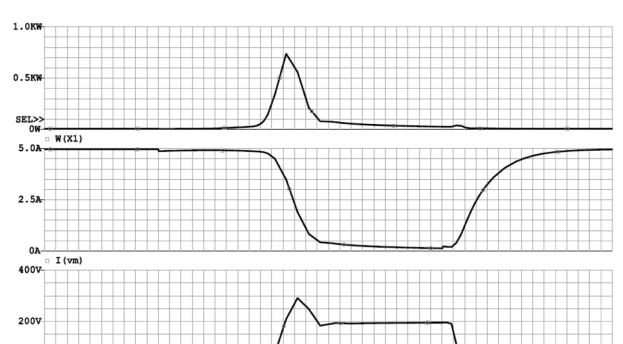


Fig. 8 L = 20µH과 $V_{th} = 3V$ 에서 전력손실, I_C , V_{CE}

등식(5)에서 t_f 는 하강시간을 의미하고 I_o , I_{tl} , C_s 는 각각 턴-오프 전류, 잔여(tail) 전류, 기생용량(parasitic capacitance)을 나타낸다. 전압은 전류를 나타내는 등식(5)를 이용하여 등식(6)과 같이 표현된다.

$$V_c = \frac{I_o - I_{tl}}{2C_s t_1} (t - t_1)^2 \quad (6)$$

등식(5)와 (6)을 이용하여 순시 전력손실은 등식(7)과 같이 표현된다.

$$P_{off} = \left[I_o - \frac{I_o - I_{tl}}{t_f} (t - t_1) \right] \frac{I_o - I_{tl}}{2C_s t_1} (t - t_1)^2 \quad (7)$$

턴-오프 에너지를 구하기 위해 등식(7)을 적분하면 등식(8)과 같이 나타낸다.

$$E_{off} = \frac{I_o^2 t_f^2 (1 - I_{ntl})}{24C_s} (1 + 3I_{ntl}) \quad (8)$$

여기서 $I_{ntl} = I_{tl}/I_o$ 로서 정량화된 잔여 전류이다. 실제로, 잔여 전류는 IGBT의 스위칭이 빠르고 전류가 높을 때 상대적으로 스위칭 속도가 느리고 전류가 낮을 때 보다 큰 영향을 준다. 시판중인 상용제품에서는 carrier 생존시간 제어(life time control)로 잔여전류의 영향을 최소화시킨 제품을 출시되고 있어 본 논문에서는 잔여전류에 대한 전력손실부분은 정량적으로 고려하지 않았다.

Fig. 4의 회로에서 인덕턴스 값이 20µH일 때 Fig. 5에서 보여주듯이 V_{CE} 의 최대 값은 270V이고 에너지 손실은 0.36mJ

이다. 에너지 손실은 Fig. 5에서 전력손실(power loss)을 시간함수로 적분해서 산출된다. 그리고, 인덕턴스 값이 40µH일 때 Fig. 6에서 보여주듯이 V_{CE} 의 최대 값은 375V까지 증가하고 에너지 손실은 0.6mJ이다. 이 결과는 인덕턴스 값이 증가할 때 에너지 손실이 증가함을 보여주고 있다.

그리고 인덕턴스 값은 일정하게 20µH로 놓고 문턱전압 값을 변화시켜 V_{CE} 값과 전력 손실에 대해서 살펴본 결과, 문턱전압을 4.85V에서 3V로 감소시킬 때 V_{CE} 값의 최대값은 시간간여이 발생되며 명미한 감소를 나타냈고 전력손실에 큰 영향을 주지 않음을 Fig. 7와 Fig. 8에서 보여주고 있다. 그래서 전력손실은 Fig. 4의 회로의 인덕턴스의 값에 따라 결정됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 설계된 IGBT의 매크로 모델을 설정한 후 동작원리를 연구하고, IGBT를 기반으로 한 인덕턴스 부하회로에서 전압 및 전류, 그리고 에너지 손실에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 부하 인덕턴스와 IGBT의 문턱전압이 전력 및 에너지 손실에 미치는 영향에 대하여 분석한 결과, 전력 및 에너지 손실은 문턱전압의 크기에 큰 영향을 받지 않고 부하 인덕턴스 값에 달려 있음을 확인하였다. 본 논문에서 IGBT를 이용한 부하회로를 가진 전력시스템 최적설계 시 고려할 파라미터에 대한 연구의 기반을 구축하였다고 본다.

참고문헌

- [1] Muhammad H. Rashid (2004) Power Electronics Circuits, Devices, and Applications, pp. 158, Pearson Prentice Hall.
 - [2] Z.H. Tong, et al (1996) Effects of Gamma Irradiation on the Insulated-Gate Bipolar Transistor, *Microelectron. Reliab.*, 36(10), pp. 1489-1498.
 - [3] M. Marceau, et al (1999) Study of Dose Effects on IGBT-Type Devices Subjected to Gamma Irradiation, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 46(6), December.
 - [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins (2003) Power Electronics, *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 24-28.
 - [5] Y.H. Lho, S.Y. Lee, P.-H. Kang (2007) Radiation Effects on IGBT under gamma Irradiation, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Oct. 17-20.
 - [6] SPICE Reference Guide (2000) Cadence Design Systems.
 - [7] Y.H. Lho (2009) Impact of Gamma Irradiation Effects on IGBT and Design Parameter Considerations, *ETRI Journal*, 31(5), October.
 - [8] Y.-J. Han, et al (2000) The Study of Manufacture and Inertia Load Test of Inverter for Electrical Multiple Unit, *Journal of the Korean Society for Railway*, 3(1), March.
 - [9] John O. Attia, et al, Effects of TID on Transistor Parameters of DC-DC Converters”, *IEEE 2007*.
 - [10] Jinrong Qian, et al, Turn-off Switching Loss Model and Analysis of IGBT under Different Switching Operation Modes, *IEEE 1995*.
- 접수일(2010년 5월 13일), 수정일(2010년 10월 3일),
 게재확정일(2010년 10월 7일)