

전력용 반도체 디바이스의 스위칭 특성과 손실에 관한 연구

김용주 한석우 마영호 김한성 *유권종

건국대학교 전기공학과 **한국 동력자원 연구소

A study on the switching character and loss of power semiconductor device

Han-Sung Kim Yong-Ju Kim Suk-Woo Han Young-Ho Ma *Gwon-Jong Yu

KON-KUK University **Korea Institute of Energy and Resources

ABSTRACT

In order to high-respone and high-reliability of devices, it depened upon how we can increase the high-frequency of the Inverter, UPS and it's application, but using high-frequency of self turn-off devices, it is important to reduce switching device loss and spike voltage of turn off. This paper proposed new methode about computer simulation of device loss, also experimental results with switching device characteristic are presented.

1. 서론

최근 전력용반도체 디바이스는 설계기술의 발달로 고내압 대용량화, 고속화, 복합화 추세에 있으며 전력전자 분야에 크게 변화를 주고있다. 이 응용의 고속화, 대용량화, 소형경량화, 소전력화 및 저단가를 실현하게 되었으며 새로운 응용분야가 개발되고 그 분야도 넓어지고 있다.

스위칭 전원에 사용되고있는 전력변환장치는 원래 고효율, 고신뢰성에 적합한 장치이며 스위칭 주파수를 보다 높임으로써 출력 파형의 개선, 제어성의 고도화, 히타절연 트랜스의 소형화를 도모 할수 있다. 그러나 고주파에 따른 스위칭 손실의 증대, EMI 발생, 드라이브 회로를 최적화해야하며 이론제가 교류가변속 시스템에서 문제점으로 대두된다. 이 문제점을 해결하기 위해서 전력용 반도체 스위칭 디바이스의 스위칭특성연구와 이용율을 충분히 발휘하여 최적한 드라이브 회로로 전력변환장치 제어회로를 설계하여야만한다. 따라서 본 논문에서는 디바이스의 스위칭특성과 손실을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해서 검토하고자 한다.

2. 전력용 반도체 디바이스의 특성

전력변환회로에 사용되는 전력용 반도체 디바이스는 "자기 소호형" 디바이스이다. 최근 전동기의 저소음화와 고속 스위칭이 가능한 대용량 디바이스가 필요하게 되었으며 POWER-MOSFET, BI-MOS복합형 디바이스, IGBT등 많은 새로운 자기 TURN-ON, OFF 디바이스가 개발되고 있으며 이 일부가 실용화 단계에 있다. 그림2.1에는 현재 전동기 드라이브에 실용화 되고 있는 자기ON, OFF 디바이스의 스위칭 주파수와 전동기 용량을 표시하였고 또, 그림 2.2는 교류가변속구동 대용량을 표시하였다.

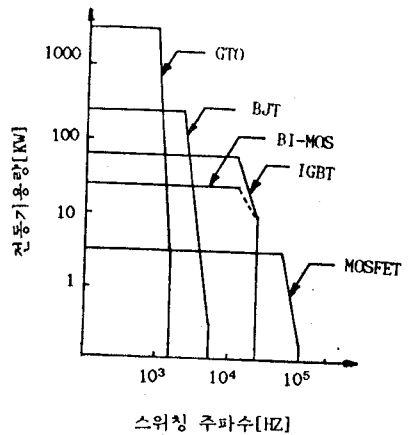


그림2.1 스위칭 주파수와 전동기 용량

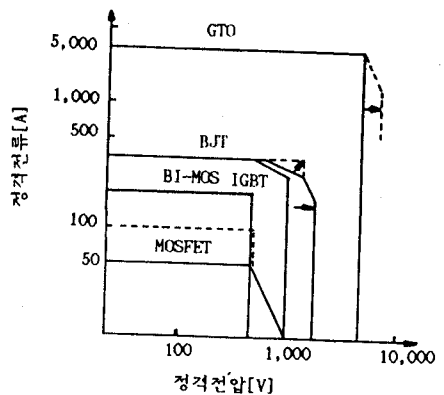


그림2.2 자기 턴오프 디바이스의 정격

3. 전력용 반도체 디바이스의 스위칭에 따른 문제점과 그 대책

전력용 반도체 디바이스의 고주파화의 특징에 따른 시스템의 전력손실은 스위칭속도, 변환효율, 방열에 관계된다. 반도체 디바이스의 전력손실은 그림 3.1에 표시된 것과 같이 ON시 정상 손실과 스위칭에 따른 ON, OFF손실이 있다. 그림 3.2는 각소자의 스위칭 특성을 나타낸다. 이 스위칭 손실은 스위칭주파수에 비례하므로 이 동작주파수의 한계를 결정할뿐 아니라 디바이스의 중요한 특징이 된다. 스위칭 손실은 디바이스를 스위칭할시에 전압이 걸리면서 전류가 흐르는 기간이 있기 때문에 발생하며 이 기간을 짧게 할수록 손실은 줄어들며 불필요하게 주파수를 높이지 않도록 해야 한다.

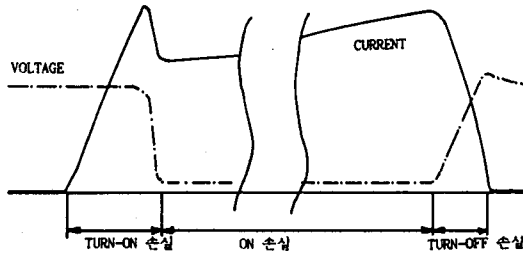
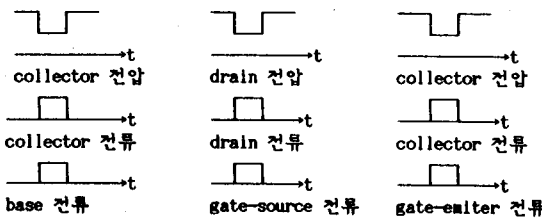


그림 3.1 디바이스의 스위칭 손실



(a) BIPOLAR-TRANSISTER (b) POWER-MOSFET (c) IGBT

그림 3.2 각 디바이스의 스위칭 특성

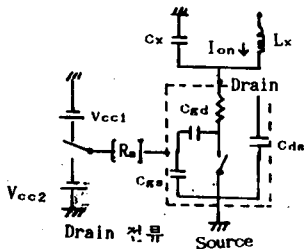


그림 3.3 POWER-MOSFET의 Switching Model

POWER-MOSFET의 손실에 대해 자세히 알아보면 소자의 스위칭 모델은 그림 3-3에 나타내었다.

- 1) 드라이브 손실: $P_d = C_g (V_{cc1} + V_{cc2})^2 f$
이 손실을 줄이기 위해서 게이트에 두꺼운 산화막 구조나 폴리실리콘의 축층구조로 전류밀도를 적게 하며 증방전에 필요한 전력과 손실은 같아진다.
- 2) 동작손실(ON손실): $P_o = V_{on} I_{on} d = R_{on} I_{on}^2 d$
- 3) 턴온 손실: $C_d V_a^2 f/2$
- 4) 턴오프 손실: $f \int_0^{t_{off}} i_d v_{dt} = C_d V_a^2 f/6$
이 오프손실에서 스파이크전압이 발생한다.

여기에서,

$C_g = C_{gs} + C_{gd}$, f: 스위칭 주파수

V_{on}, I_{on}, R_{on} : 온전압, 전류, 저항

d: duty factor

V_a : 턴온 직전의 드레인전압(평상시는 입력전원전압)

$i_d = I_{on} - J_{off} t$ ($J_{off} = G_{dv} / dt$, J_{off} : 드레인 차단속도)

G_m : 전달콘덕턴스 dv_g/dt : 스위칭 속도

$C_{gs} = C_{gs} + C_x$: 드레인 부하용량

$v_a = J_{off} t^2 / 2 C_d$

$v_x = I_{on}^2 C_d J_{off} (t_d = 0 \text{ 일 때의 드레인전압})$

3.1 고속화를 위한 드라이브

고속화와 고응답을 얻기위해 디바이스의 고주파화가 요구된다. 이 고주파화의 방법으로 Z.V.S(ZERO VOLTAGE SWITCHING)와 Z.C.S(ZERO CURRENT SWITCHING)가 사용되며 아래표는 특성을 간략화 하였다.

Z.V.S	Z.C.S
TURN-ON 손실 ZERO	OFF손실 ZERO
다이오드 스트레스적용	스트레스없음
스너버회로가 간단	회로가 복잡
ON 손실이 큼	큼
MOS-FET, FAST BIPOLA	BIPOLA, IGBT, GTO

이를 사용함으로써 고조파화를 더 용이하게 할수있으며 또다른 방법은 TURN-OFF 시간을 짧게하는 것이다. 디바이스의 TURN-OFF 시간이 짧으면 짧을수록 역바이어스를 크게하는 것이 유리하다. TURN-OFF 특성을 충분히 발휘하기 위하여 TURN-OFF 시간을 짧게하는 여러가지 드라이브법이 연구되어 왔다. 그러나, TURN-OFF 시간을 단축하면 단락전류의 di/dt가 커지고 드라이브에 걸리는 스파이크 전압이 증가하여 안전 동작범위(ASO: Area of Safety Operation)를 벗어나서 디바이스를 파괴하므로 스너버회로와 크렘프 회로등을 첨가시켜야 한다. 특히 바이폴라트랜지스터에서는 역 바이어스로서 안전동작영역이 좁아지므로 스너버의 용량을 고려해야만 한다.

3.2 과전압방지 대책

(I) TURN-OFF시 디바이스의 전압, 전류의 궤적은 그림 3.4와 같이된다. 반도체 디바이스는 각각의 고유안전동작영역이 있고 전압, 전류는 이 영역내에서 도통하지 않으면 안된다. 그림 3.4와 같이 전압, 전류의 궤적이 A.S.O로부터 탈출하면 디바이스는 파괴된다. 그래서 스위칭디바이스와 직렬의 인덕턴스(예를들면 부하, 변압기의 배선인덕턴스)에 축적된 에너지가 전류를 단축하기 위해서 디바이스에 스파이크 전압과 TURN-OFF 손실로서 나타나게 된다. 이 스파이크 전압은 전원전압의 3배까지나타나게 된다. 따라서 디바이스를 보호하기 위하여 에너지를 흡수하는 방법이 필요하게 된다.

(II) 크렘프회로와 스너버회로: 디바이스의 동작을 A.S.O 내에 지속시키기 위해서 전압 크렘프회로와 스너버회로가 일반적으로 필요하다. 크렘프회로는 일반적으로 디바이스의 전원 전압이 클때에 사용된다.

그림 3.5는 크렘프회로의 경우로서 디바이스의 동작파형이다. 이 그림에서 알수 있듯이 크렘프회로로서 인덕턴스의 에너지를 상당부분 흡수되지만 디바이스가 소비하는 에너지 또한 큰것을 알수 있다. 또, 크렘프회로와 구체적으로 디바이스의 배선을 조금 길게하면 잔류인덕턴스가 크고 점성으로 표시한것과 같이 전압이 크게되며 배선을 조금 짧게 해서 잔류인덕턴스를 작게해야만 했다. 본 연구의 시스템은 배선인덕턴스를 작게유지시키기 위해서 동판을 배선하여 패축은 효과를 얻을 수 있었다. 일반적으로 와이어 배선은 10cm 에

서 100mH 이며 동판용 사용함으로 인하여 10배가량 인덕턴스를 줄일수 있었다.

스누버회로는 다이오스가 소비하는 TURN-OFF손실을 더욱더 적게하는 방법이다. 이 예를 그림 3.6에 표시했고 이 회로의 동작파형을 그림 3.7에 나타냈다. 그리고 회로를 적당히 설계하면 이처럼 다이오스가 소비하는 전력을 대폭 감소시킬 수 있으며 스누버회로에 흡수하는 에너지를 이스누버 저항에서 소비하게 되므로 회로손실이 증가된다. 이처럼 스위칭 주파수에 비례하는 TURN-OFF를 할시 손실을 다이오스가 소비하든가 스누버회로가 소비하든가의 선택은 주파수의 중요한 문제이다. 손실전력은 스위칭에 속적된 에너지 $1/2 \cdot LI^2$ 이며 단속전류의 2승에 비례하므로 전류가 큰 대용량 장치는 스위칭주파수가 크지않게되는 원인의 하나이다.

(III)스파이크 전류제어용 아모비스

C.R스누버회로도 다이오드에 의해 발생하는 노이즈를 본질적으로 해결하지 못한다. 그래서 아퍼모스 자성재료를 사용한 아모비스를 회로에 직렬로 삽입하면 다이오드전압을 2/3으로 줄일수 있다. 이 소자를 Magnetic Snubber이라고 부른다.

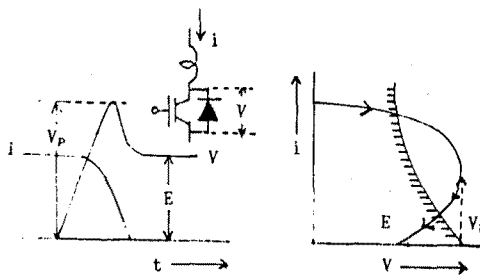


그림 3.4 턴오프시 안전동작영역

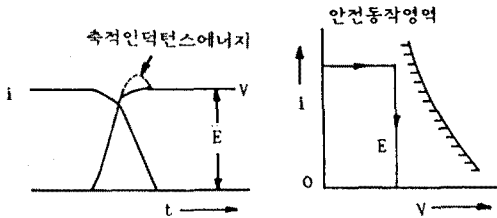


그림 3.5 크렘프회로의 동작



그림 3.6 스누버회로

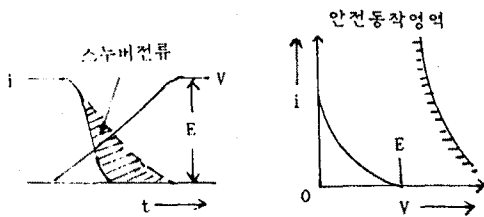


그림 3.7 스누버회로의 동작

4. 스위칭 특성 실험결과

중소용량의 교류전동기가변속 드라이브용 전력반도체 스위칭 다이오드는 최근 주목할만하며 TURN-OFF형다이오스, 즉 바이폴라 트랜지스터, POWER-MOSFET, IGBT 소자의 스위칭 특성 실험결과에 대해서 설명한다. 이 실험에 사용한 각 다이오스의 정격의 비교를 위해 정격전압 450(V), 정격전류50(A)

를 사용했다. 표4.1은 다이오스의 특성을 나타냈다. 스위칭 특성 실험결과를 표4.2에 요약했다.

또 각다이오스의 스위칭손실을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 계산했다. 흐름도는 그림 4.3에 나타냈으며 입력데이터는 기본적으로 주어지는 역률, 주파수, 온도등 12가지이며 손실의 합은 온도손실, 턴온, 턴오프, 동작손실 및 다이오드의 온도손실, 동작손실, 역회복 손실의 총합으로 나타낼 수 있으며 그 중 턴온손실과 턴오프손실의 결과를 그림 4.4의 (a), (b)에 나타냈다. IGBT소자는 ON시에 MOSFET과 거의 마찬가지로 특성을 나타내고 있고 POWER-MOSFET보다 대용량화 할 수 있으며 정격전류 근처에서는 전압이 작으며 스위칭손실 등을 고려하면 전동기가변속 드라이브 시스템과 UPS등의 손시치제어에 IGBT를 응용하면 대단히 유효하다고 생각된다. 그림 4.5는 각 다이오스의 TURN-ON, TURN-OFF시의 실측 스위칭특성파형을 표시했다.

	BJT	MOSFET	IGBT
구동방식	전류	전압	전압
전류하강시간	~ 1.0	~0.1	~0.5
속적시간	~20	—	~1
고내압화	○	○	○
안전동작영역	○	◎	○
병렬접속	○	○	○

단위 μS

표4.1 다이오스의 특성비교(◎:大 ○:中 △:小)

	BJT	MOSFET	IGBT
턴온지연시간	0.05	0.45	0.45
상승시간	0.20	0.35	0.25
턴오프 지연시간	2.50	0.45	0.60
하강시간	0.80	0.20	0.40

단위: μs

표 4.2 각 다이오스의 유도부하시 스위칭 특성

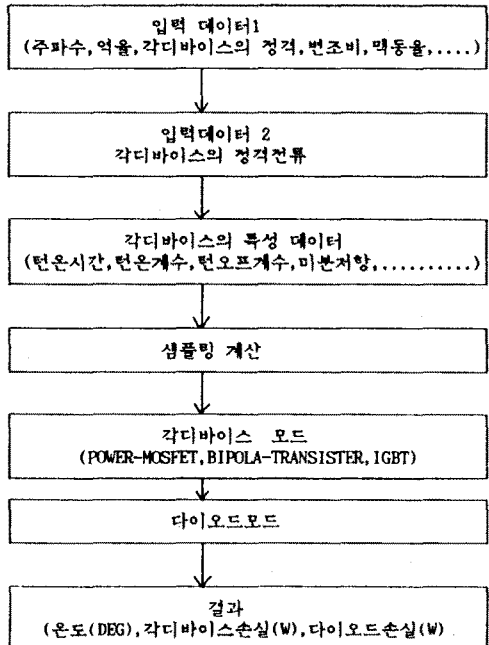


그림 4.3 각다이오스 손실계산 C/P 흐름도

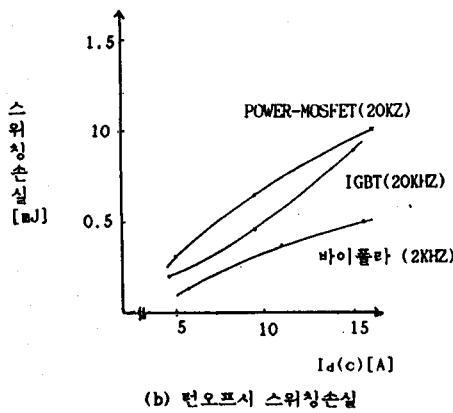
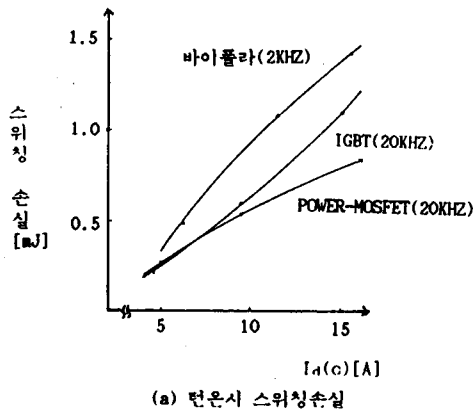
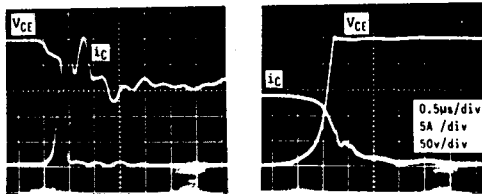
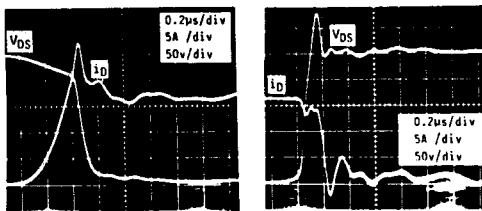


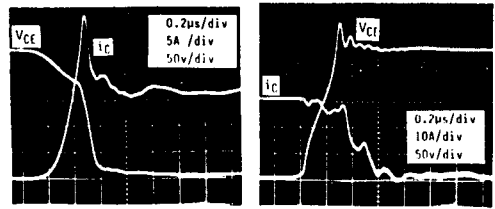
그림 4.4 각 디바이스의 스위칭 손실비교



(a) 바이폴라 트랜지스터



(b) POWER-MOSFET



(C) IGBT

그림 4.5 각 디바이스의 스위칭 특성파형

5. 결론

본 논문은 바이폴라 트랜지스터, POWER-MOSFET, IGBT 등의 전력용 반도체 디바이스의 스위칭특성과 손실을 비교, 검토하였으며 소자의 스위칭손실 다음으로 소자의 표면적과 온도손실이 출력파형에 미치는 영향을 준다는 것을 알수있었다. 또한 소자의 손실에 영향을 주는 12가지변수를 사용하여 전손실을 계산하는 새로운 손실방법을 제시하였다. 따라서 드라이브에 적당한 소자를 선택 사용하는 것이 스위칭 손실과 온도손실, 표면적 손실등을 최소화 할수있는 방법이라고 생각된다.

참고문헌

- 1) 劉權種, "瞬時値追従制御形 インハ-タによ 交流電動機可變速 시스템に關 する研究", 1989
- 2) I.Yoshida, M.Kubo & S.Ochi: "A high power MOSFET with a vertical drain electrode and a meshed gate structure", IEEE J. solid - state circuits, SC-11, 472(1976)
- 3) M.S Adler & S.R Westbrook: "Power Semiconductor Switching Devices - A Comparison Based on Inductive Switching ", IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, 947(1982)
- 4) W.McMurray: "Modulation of the Chopping Frequency in DC Choppers and PWM Inverters having Current - Hysteresis Controls", PESC Conf. Records, p. 295, June 1983.
- 5) J.Holtz, S.Stadtfield, "A Predictive Controller for from a Switched Voltage Source", IPEC International Power Electronics Conference Record, p. 1665, Tokyo 1983.
- 6) Milan Kubat "Power Semiconductors" p.186-p224