

PT와 NPT 구조를 가진 3300V HVIGBT 스위칭 특성 비교 연구

엄기주, 서범석*, 현동석

한양대학교 전기공학과, *페어차일드 코리아 반도체 주식회사

Switching Performance of 3.3kV HVIGBTs with PT and NPT Structures

Kee-Ju Um, Bum-Seok Suh*, Dong-Seok Hyun

Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ., Fairchild Semiconductor

Abstract

이 논문은 3300V 정격의 PT와 NPT HVIGBT의 스위칭 특성을 비교하여 제시한다. 실제적인 응용을 고려하여 hard 스위칭 조건에서 실험하여 얻어진 데이터 수치들을 보인다. 이 비교 평가가 보다 나은 스위칭 특성들을 얻기 위한 기반이 될 수 있을 것이다

1. Introduction

최근 몇 년간, 1996년 초부터 반도체 시장에 선보인 3.3kV HVIGBT는 산업현장에서 점점 인기를 더해가고 있다. 이 소자를 인버터나 컨버터 등의 시스템에 사용할 때 동작 주파수가 가장 중요한 결정사항에 속하게 되는데 이를 결정할 때 스위칭 손실은 가장 중요한 요인이 된다. PT와 NPT 구조간의 스위칭 손실에 관한 비교 연구 논문이 여러 편 발표되었으나 모두 1200V이하의 소자에 관한 것이었다. 1200V IGBT의 경우에 PT IGBT의 스위칭 손실은 NPT IGBT의 손실에 비해 turn-on 스위칭 손실은 약간 크고 turn-off 손실은 상당히 컸다[1]. 600V IGBT 경우에는 PT 구조의 IGBT switching 손실이 NPT IGBT의 경우보다 turn-on 손실에선 약간 작으나 turn-off 손실은 역시 상당히 크게 나타났다[3]. 낮은 전력 급의 IGBT와는 다르게 고압용 IGBT인 3.3kV HVIGBT에서는, 특히 turn-off 손실에서 다른 결과를 얻었다. 그 구조상의 특징과 제조 공정의 기술상의 문제점 때문에 고압에서는 NPT IGBT가 유리하리라는 예상과는 다르게 PT HVIGBT의 중요한 전기적 특성이 NPT HVIGBT와 견줄 만하다는 점에 주목해 볼 필요가 있다. 본 논문에서 PT 구조의 IGBT와 NPT 구조의 IGBT의 실험 파형을 통하여 스위칭 손실과 스위칭 손실에 영향을 미치는 파라미터의 비교를 통하여 두 소자간의 스위칭 특성을 분석해 보고자 한다.

2. PT와 NPT IGBT의 기본적인 소자 구조

PT와 NPT 소자의 기본적인 구조를 그림 1에 보였다. 두 구조간의 중요한 차이는 n+ buffer 층이다. PT 구조에서만 n+ buffer 층을 발견할 수 있는데 이는 n-drift 층을 줄이기 위한 구조이다. IGBT에는 잘 알려진 saturation 전압과 turn-off 손실간의 trade-off 특성이 존재한다. saturation 전압과 turn-off 손실은 각각 가장 주요한 요소들인 n-drift 영역의 저항과 tail 전류에 의해 크게 좌우된다. PT, NPT 두 구조 모두가 switching 손실에 주요한 영향을 미치는 요소인 tail 전류의 영향을 최소화하기 위한 효과적인 방법이 된다. 두 구조 모두 tail 전류를 줄이는 같은 목적을 가지기는 하지만 서로 다른 방법으로 문제 해결에 접근한다. 기본적으로, 이론적으로는 고압의 정격에서 NPT 구조가 더 낮은 switching 손실을 가지게 될 것이 기대된다. 낮은 switching 손실을 위해 NPT 구조는 tailing 구간 동안 전류의 크기를 최소한으로 줄이도록 디자인한다. 이는 IGBT의 MOSFET 부분이 전체 전류 량 중 되도록 많은 부분을 차지하도록 함으로써 실현된다. 전체 전류 량 중 MOSFET 부분을 최대화하는 것은 실제로 가능한 IGBT 내부 PNP transistor의 beta값을 낮게 만들면 된다. 높은 저지 전압을 위해 두껍게 만들어야 하는 이 drift 영역은 PNP transistor의 base 영역이 되므로 PNP transistor는 자연스럽게 낮은 beta 값을 갖게 된다. emitter efficiency를 낮추어도 낮은 beta 값을 얻을 수 있다. emitter efficiency를 낮추려면 p+ doping 농도를 낮추면 되는데 따라서 p+부분의 저항이 늘게 된다. 하지만 p-type anode에 의해 발생하는 도통손실 부분이 상대적으로 적어지기 때문에 고압 정격의 소자에서는 더 쉽게 실현할 수 있다. 따라서 PNP transistor의 emitter 부분의 도핑농도를 낮게 하여 emitter efficiency를 낮추게 된다. NPT 구조와는 다르게 PT 구조는 PNP transistor의 collector 전류 량을 최소화하기 보다 n-drift 영역과 PNP transistor의 p-type anode 영역간에 n+ buffer 층을 두어 이 층을 과잉 hole의 sink로 사용하여 빨리 없애므로써 tail 전류 문제를 해결한다. PT IGBT는 몇 가지 불리한 점이 있다. PNP transistor 즉 PT 소자의 PNP transistor 부분은 같은 정격의 NPT 소자보다 더 작은 base 두께를 가지므로 더 큰 beta 값을 갖게 된다. 따라서 NPN transistor의 전류를 낮추는 것은 근본적으로 불리하며 VCE(sat) 전압에 근본적으로 NPT보다

유리한 점을 이용한다. 소수 캐리어의 lifetime을 줄이게 되면 n-drift 영역의 VCE(sat) 전압은 증가하지만 p+쪽에서 hole 전류가 줄고 tail 전류가 감소하는 비율이 증가한다. 이 때문에 또 다른 문제가 발생한다. PT 구조는 lifetime killing을 이용하기 때문에 온도가 상승하게 되면 lifetime이 급격히 증가하고, 따라서 Vd-(drift 영역의 전압강하 분)가 감소하게 된다. 이는 곧 낮은 전류 레벨에서 VCE(sat)의 NTC(negative temperature coefficient) 특성을 의미한다. - 높은 전류 레벨에서는 V(MOSFET)가 높고 PNP transistor의 VBE는 줄어들어 PTC 특성을 갖게 된다. - 고용량 화를 위해서는 불가피하게 칩이 병렬 구조로 구성되어야 하는데 이 NTC 특성은 치명적인 불리한 점이다. 낮은 전압에서 기존 PT IGBT는 p' substrate 층위에 epitaxial 층을 성장시킨다. 또 일반적으로 전자 방사에 의해 lifetime을 조정한다. 그러나 고압의 IGBT는 n-drift 영역을 늘려야 하므로 epitaxial wafer와 전자 방사를 사용하는 것은 현실적이지 못하다[4]. 또한 off 상태에서 PT 구조는 비슷한 정격의 NPT 구조의 IGBT에 비해 더 큰 전계가, 저지전압이 걸리게 되는 접합 면에 걸리게 된다[2].

3. 실험 회로와 조건

Step-down dc-dc converter가 PT와 NPT 소자간의 switching 특성 비교를 위해 사용되었다. 40μH의 유도성 부하를 사용하였다. 위 단 IGBT 내 FWD의 영향을 고려하여 실험대상이 되는 아랫단 소자(DUT)와 동일한 종류의 소자를 위 단에도 사용하였다. DUT의 게이트 단에 2 pulse를 인가하였다. 첫 번째 신호를 0초에 주었고, 두 번째 신호는 약 50μ초 후에 주었다. 모든 실험은 PT와 NPT 소자 모두에 동일하게 시행되었다. VDC 전압은 1600V로 고정하고 톨렉터 전류(IC)를 350A, 600A, 800A, 1250A로 변화시켰고 게이트 저항(Rg)은 1.0Ω, 1.5Ω, 2.7Ω, 3.8Ω으로 각각 바꾸어 실험하였고 실험온도는 80℃이었다. 모든 실험 파형은 turn-on 또는 turn-off 신호가 gate driver unit(GDU)에 인가된 시점을 0초로 하여 나타냈다. 그림 9에 파형 분석에 사용된 각종 파라미터의 정의를 나타냈다.

4. Ic 변화 시 switching 특성

4-1. turn-on 특성

그림 3에서 IC 변화 시 두 구조의 turn-on 파형을 보였다. VGE 파형에서 Miller plateau 부분에서 NPT는 전류레벨이 변함에 따라서 VGE 값간의 간격이 벌어짐을 볼 수 있고 PT는 상대적으로 그 간격이 좁다. 이로 NPT 소자의 trans-conductance가 실험된 전류범위에서 PT 소자보다 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 상승 기울기가 두 소자간 사뭇 다른 것이 흥미롭다. VGE 상승 초기에 NPT의 IG전류가 PT소자보다 더 크게 나타나며 이는 동일한 조건에서 gate driver의 구동전력이 더 필요함을 나타낸다. VCE가 떨어지는 시간은 NPT 소자에서 더 길게 나타나며 IC가 증가할수록 더 길어진다. di/dt는 서로 비슷하지만 PT 소자는 IC전류가 커질수록 over-current가 크게 나타났지만 NPT 소자의 over-current는 별다른 변화가 없었다. turn-on power 파형에서

NPT 소자의 긴 switching 시간을 쉽게 알아볼 수 있다. NPT 소자의 느린 전압 강하는 turn-on 에너지 파형에서 NPT가 더 높은 값을 가지는 이유를 잘 설명한다. 최대 전력치도 NPT가 항상 높았다.

4-2. turn-off 특성

그림 4에서 IC 변화 시 두 구조의 turn-off 파형을 보였다. VGE파형에서 1250A의 경우를 제외하고는 VGE값이 VGG+ 값인 15[V]에서부터 떨어지지 않는데, 이는 부하가 유도성이므로 원하는 전류 값을 얻기 위해 on-pulse의 폭이 짧아져, turn-on 후에 VGE 값이 15V로 상승하기 이전에 off 신호를 받기 때문이다. 이 때문에 낮은 전류에서 지연 시간이 실제보다 더 짧게 나타난다. turn-on의 경우와 마찬가지로 turn-off시 NPT 소자의 IG 파형의 전류 값이 전반적으로 PT보다 크게 나타났다. dv/dt는 PT가 크고 di/dt와 over-voltage는 NPT가 크게 나타났으나 근사하였고, 종합적으로 turn-off 에너지는 비슷한 양상을 보였다. 최대 전력치 역시 비슷한 값으로 나타났다.

4-3. Ic 변화 시 파라미터 비교

그림 7에 IC 변화 시 turn-on, turn-off의 각종 파라미터(지연 시간, over-voltage, over-current, di/dt, dv/dt, 상승시간, 하강시간)의 변화를 도표로 나타냈다. 지연 시간은 turn-on시 VGG-의 10%에서부터 IC의 10%상승 시까지, turn-off시 VGG+의 90%에서부터 VCE의 10%상승 시까지 시간으로 정의하였으므로 초기에 VGE의 상승과 하강이 빠른 PT 소자의 지연시간이 도표에서는 조금 크게 나온다. turn-off시 실질적으로는 VCE의 상승 시작 시각을 보면 PT가 off 전반적으로 조금 빠르다. 저항이 커지거나 전류가 커지면 그 차이는 커졌다. turn-on 지연시간은 PT가 모든 경우에서 컸다. turn-on과 turn-off 모두에서 di/dt는 PT, NPT 간에 근소한 차이를 보이나 dv/dt는 PT가 항상 높았다. turn-on 시의 di/dt, turn-off시의 dv/dt와 di/dt에 비해 상대적으로 turn-on의 dv/dt가 크게 나타났는데 이 때문에 turn-on energy가 turn-off energy에 비해 크게 나타났다. tail 전류에 의해 turn-off 에너지가 받는 영향을 감안하더라도 turn-on 에너지가 전체 switching 손실에 더 크게 기여함을 알 수 있다.

5. Rg 변화 시 switching 특성

5-1. turn-on 특성

그림 5에서 Rg 변화 시 두 구조의 turn-on 파형을 보였다. 두 구조 모두 VGE 파형이 Rg값이 변함에 따라 느려지고 IG 전류 값도 작아졌다. 하지만 NPT의 VGE와 IG가 더 큰 변화를 보임에도 불구하고 VCE의 두 소자 모두 dv/dt는 별반 변화가 없었다. PT 만이 저항 값에 따라 over-current 값이 줄었다. switching 손실은 역시 NPT가 컸지만 Rg 변화에 따른 switching 손실 변화는 IC 전류 변화시 보다 작았다. 따라서 switching 손실은 IC 변화에 더 민감함을 알 수 있다.

5-2. turn-off 특성

그림 6에서 Rg 변화 시 두 구조의 turn-off 파형을 보였다. 이

경우 가장 두드러진 점은 NPT 소자가 Rg 저항 값 변화에 더 민감하며 PT 소자가 Rg 값에 따른 변화가 적다는 것이다. di/dt, over-voltage, 지연시간, 최대 전력치 그리고 turn-off 에너지에서 그 변화 폭이 모두 작았다. dv/dt는 NPT에 비해 상대적으로 작았다. turn-off 에너지는 큰 저항 (3.8Ω)에서는 서로 비슷한 값을 가졌으나 낮은 저항(1.0Ω)에서는 오히려 NPT 소자가 낮은 값을 가졌다.

5-3. Rg 변화 시 파라미터 비교

그림 8에 Rg 변화 시 turn-on, turn-off의 파라미터들의 변화를 도표로 나타냈다. 두 소자 모두 turn-off시 dv/dt는 눈에 띄게 줄었으며 NPT 소자는 di/dt와 over-voltage가 저항이 증가함에 따라 감소했다.

7. 결론

turn-on 손실은 NPT가 항상 높았으며 IC 전류가 증가할수록 PT 소자와 NPT 소자의 turn-on 손실 차는 커졌다. turn-off 손실은 서로 비슷하였으나 낮은 저항 값에서는 PT 소자의 손실이 크게 줄지 않아 오히려 NPT 소자의 turn-off 손실이 더 낮게 나타났다. switching 손실 면에서 turn-off 손실은 tail 전류 때문에 turn-on 손실보다 중요하게 생각되어져 왔다. 하지만 본 논문에서 실험 대상이 된 3.3kV NPT-IGBT는 동일한 조건에서 turn-on 손실이 turn-off 손실보다 눈에 띄게 크게 나타났다. 그래서 일반적으로 turn-on 저항을 turn-off 저항보다 작게 만드는 방법이 흔히 사용되기도 한다. 하지만 실험대상이 된 PT, NPT 소자의 경우 저항 변화에 따른 switching 손실의 변화 정도를 감안하면 switching 손실을 줄이기 위한 다른 방법들을 사용하거나 혼용해야 할 것이다. PT 보다는 NPT가, turn-off 보다는 turn-on의 경우 switching 손실을 줄이는데 초점을 두어야 할 것이다.

참고 문헌

[1] Azzopardi, S., Janet, C., Vinassa, J.M. and Zardini, C., "Switching Performances Comparison of 1200V Punch-Through and Non Punch-Through IGBTs under Hard-Switching at High Temperature," *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 1201-1207, 1998

[2] Mohan, Ncd, Underland, Tore M. and Robbins, William P., "Power Electronics," *John Willey & Sons Inc.*, pp. 583, 634-639, 1995

[3] Siemieniec, R., Metzler, M. and Herzer, R., "Comparison of PT and NPT Cell Concept for 600V IGBTs," *EPE Conf. Rec.*, pp. 4.024-4.028, 1997

[4] Ishii, K., Konishi, Y., Takeda, M., Thal, E. and Debled, G., "A New High Power, High Voltage IGBT," *Power Conversion Conf. Rec.*, pp.185-190, 1997

[5] Azzopardi, S., Janet, C., Vinassa, J.M. and Zardini, C., "Dynamics Behaviour of Punch-Through IGBT in Hard Switching Converters at High Temperature," *EPE Conf.*

Rec., pp. 4.001-4.006, 1997

[6] Baliga, B. Jayant, *Power Semiconductor Devices, PWS*, pp. 201-215, 426-485, 1995

[7] Brunner, H., Hierholzer, M., Laska, T., Porst, A. and Spanke, R., "3300V IGBT Module for Traction Application," *EPE Conf. Rec.*, pp.1.056-1.059, 1995

[8] Wies, B. and Bruckmann, M., "A New Gate Driver Circuit for Improved Turn-Off Characteristics of High Current IGBT Modules," *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp. 1073-1077, 1998

[9] Hierholzer, M. and Bayerer, R., "Improved Characteristics of 3.3kV IGBT Modules," *Power Conversion Conf. Rec.*, pp.201-204, 1997

[10] Yilmaz, Hamza, Benjamin, John L., Dyer, Raymond, F., Chen, Li-Shu S., Dell, W. Ron Van and Piper, George C., Comparison of the Punch-Through and Non-Punch-Through IGT Structures, *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 22, no. 3, pp. 466-470

[11] Steffen Bernet, Ralph Teichmann, Adrian Zuckerberger, and Peter K. Steimer, Comparison of High-Power IGBTs and Hard-Driven GTOs for High-Power Inverters, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol., 35, No. 2, pp. 487-495, March/April, 1999.

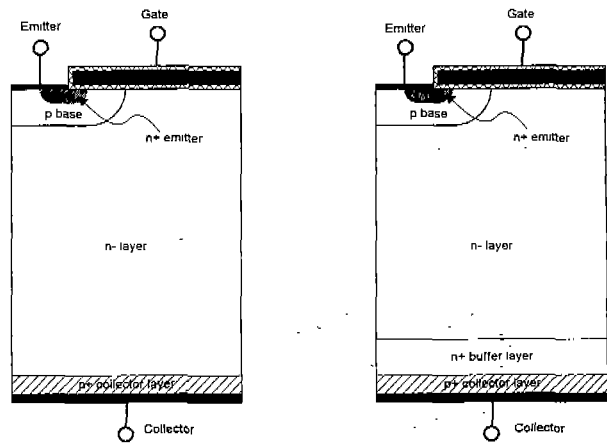


그림 1. PT와 NPT IGBT의 기본적인 구조

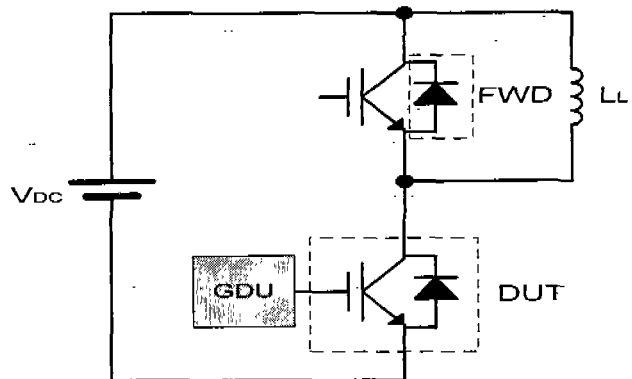


그림 2. PT와 NPT IGBT의 실험 회로

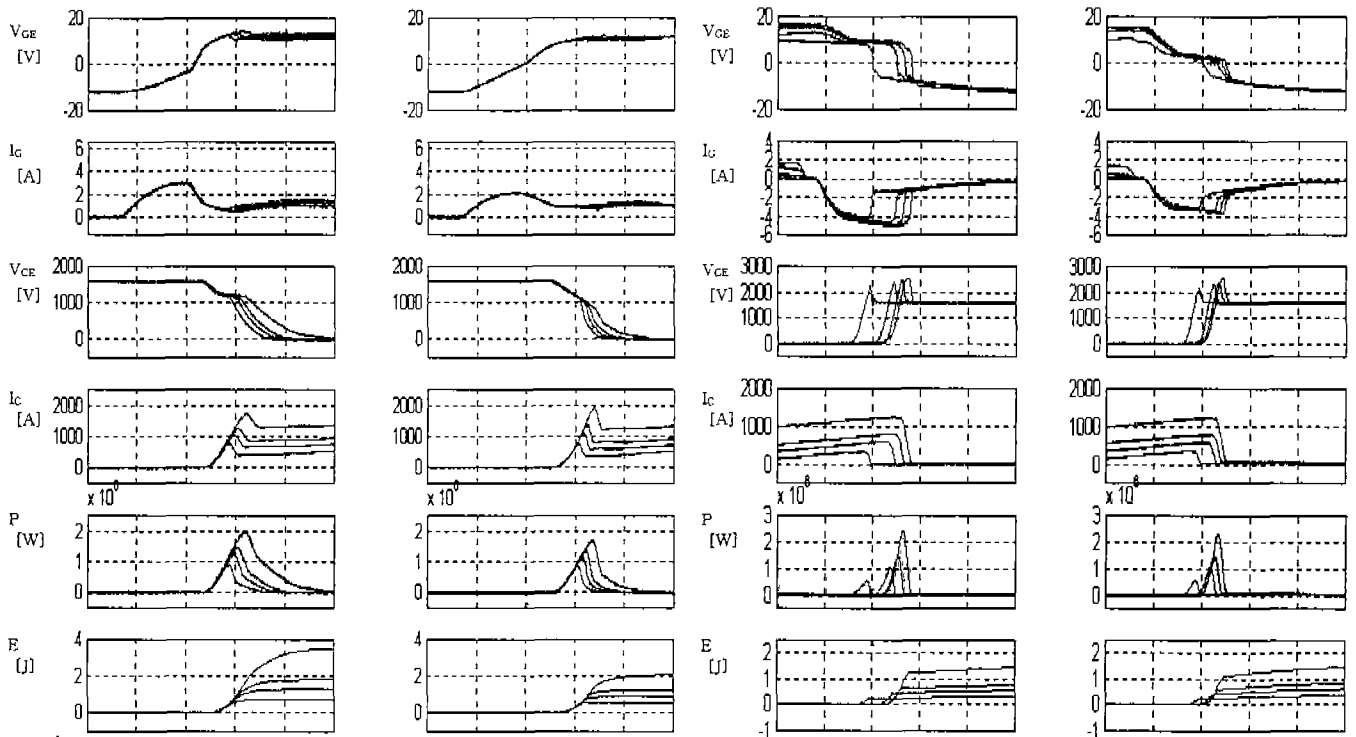


그림 3. PT-IGBT와 NPT-IGBT의 I_C 변화 시 turn-on 비교 파형
 [Test 조건: $V_{GG^+}=15V$, $V_{GG^-}=-12V$, $V_{DC}=1600V$, $T=80^\circ C$,
 $R_g=3.8\Omega$, $I_s=350, 600, 800, 1250A$, $time=2\mu s/div$]

그림 4. PT-IGBT와 NPT-IGBT의 I_C 변화 시 turn-off 비교 파형
 [Test 조건: $V_{GG^+}=15V$, $V_{GG^-}=-12V$, $V_{DC}=1600V$, $T=80^\circ C$,
 $R_g=3.8\Omega$, $I_c=350, 600, 800, 1250A$, $time=2\mu s/div$]

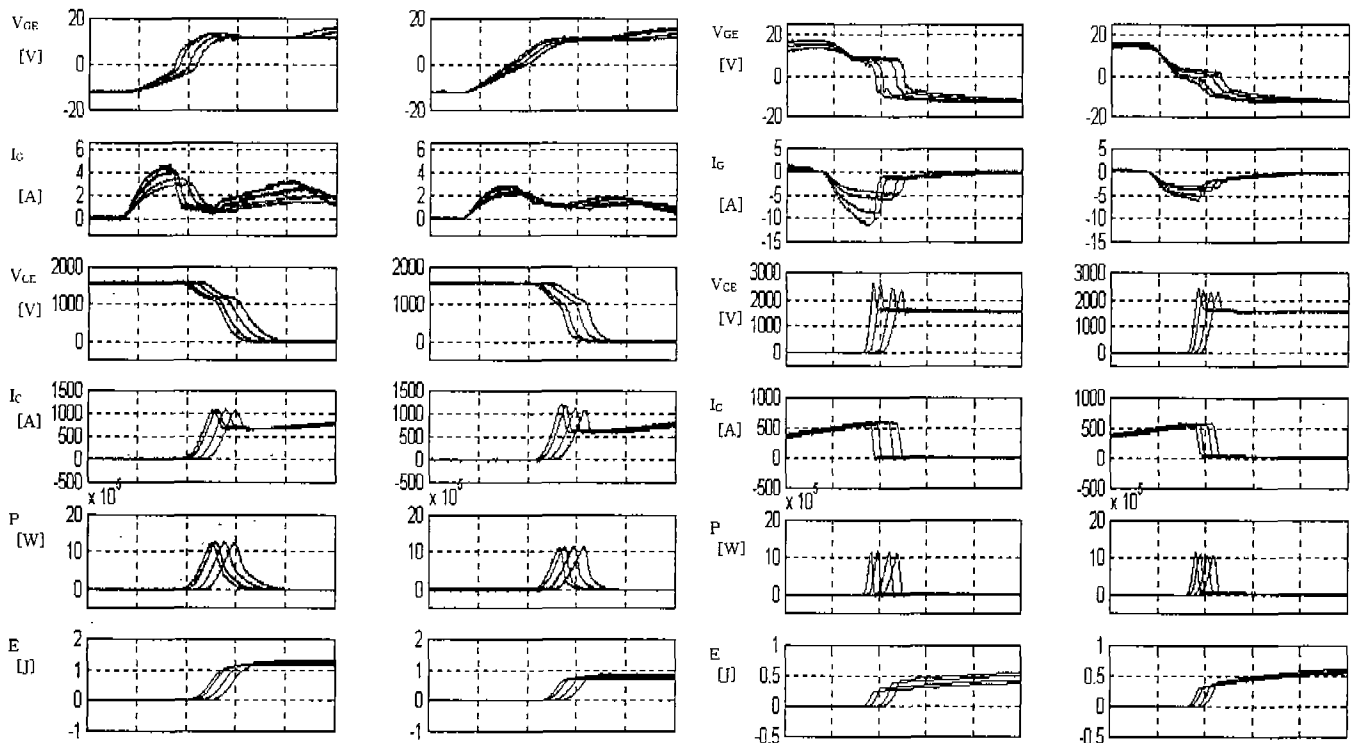
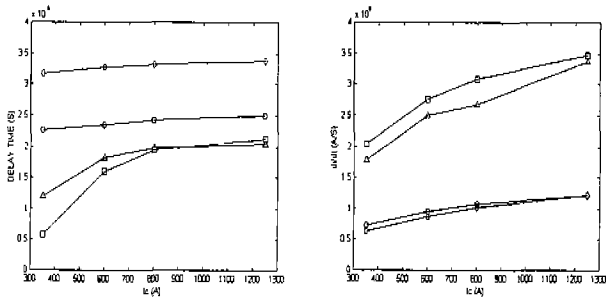


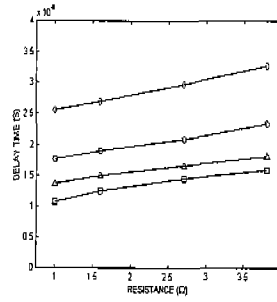
그림 5. PT-IGBT와 NPT-IGBT의 R_g 변화 시 turn-on 비교 파형
 [Test 조건: $V_{GG^+}=15V$, $V_{GG^-}=-12V$, $V_{DC}=1600V$, $T=80^\circ C$,
 $I_c=600A$, $R_g=1.0, 1.5, 2.7, 3.8\Omega$, $time=2\mu s/div$]

그림 6. PT-IGBT와 NPT-IGBT의 R_g 변화 시 turn-off 비교 파형
 [Test 조건: $V_{GG^+}=15V$, $V_{GG^-}=-12V$, $V_{DC}=1600V$, $T=80^\circ C$,
 $I_c=600A$, $R_g=1.0, 1.5, 2.7, 3.8\Omega$, $time=2\mu s/div$]



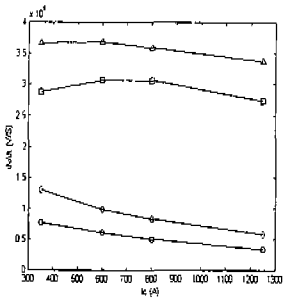
(a) 지연 시간

(b) di/dt

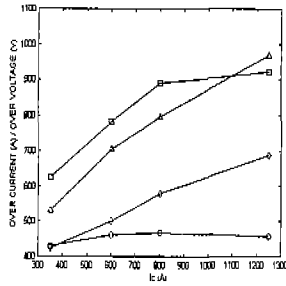


(a) 지연 시간

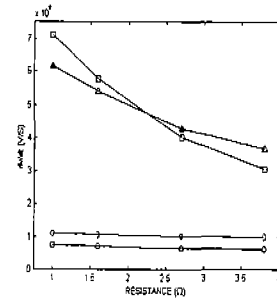
(b) di/dt



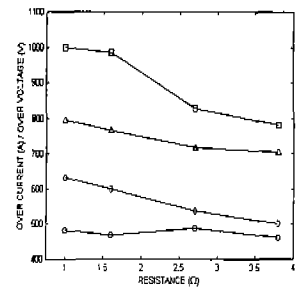
(c) dv/dt



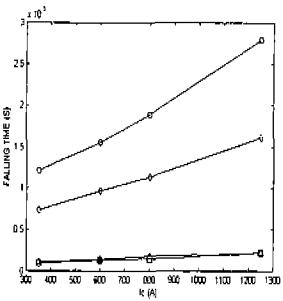
(d) over-current/voltage



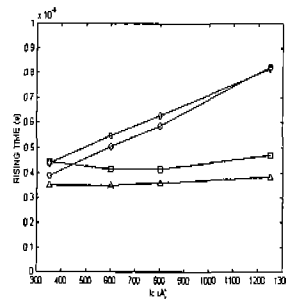
(c) dv/dt



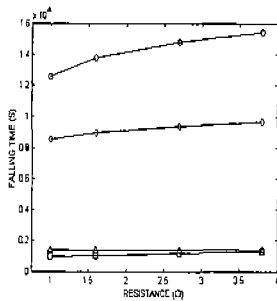
(d) over-current/voltage



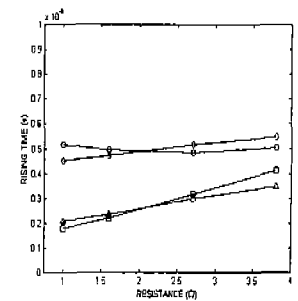
(e) 하강 시간



(f) 상승 시간



(e) 하강 시간



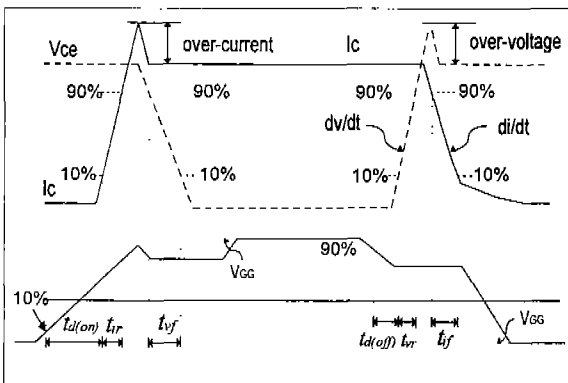
(f) 상승 시간

그림 7. PT-IGBT와 NPT-IGBT의 Ic 변화시 파형 비교

Test 조건 : $V_{GG+}=15V$, $V_{GG-}=-12V$, $R_g=3.8 \Omega$, $T=80^\circ C$,
 $V_{DC}=1600V$, $I_c=350, 600, 800, 1250A$
 ○ : NPT turn-on, □ : NPT turn-off
 ◇ : PT turn-on, △ : PT turn-off

그림 8. PT-IGBT와 NPT-IGBT의 Rg 변화시 파형 비교

Test 조건 : $V_{GG+}=15V$, $V_{GG-}=-12V$, $I_c=600A$, $T=80^\circ C$,
 $V_{DC}=1600V$, $R_g=1.0, 1.5, 2.7, 3.8 \Omega$
 ○ : NPT turn-on, □ : NPT turn-off
 ◇ : PT turn-on, △ : PT turn-off



[$t_{d(on)}$: turn-on 지연 시간, t_{tr} : I_c 상승 시간, t_{vf} : V_{CE} 하강 시간
 $t_{d(off)}$: turn-off 지연 시간, t_{br} : I_c 하강 시간, t_{bf} : V_{CE} 상승 시간]

그림 9. 스위칭 파형과 관련된 각종 파라미터의 정의