기획시리즈 ①

신 전력반도체소자 기술동향

▮ 노의철, 김흥근, 안진우 / 부경대, 경북대, 경성대 교수

머리말

전력전자기술은 다양한 전기전자장치 및 기기들의 고성능화, 고효율화, 소형경량화, 저소음화를 이루기 위해 1957년 SCR 사이리스터가 개발된 이후 80~90년대를 거치면서 비약적 발전을 거듭하고 있다. 전력변환장치가 용도와 목적에 따라 최적의 성능을 갖추기 위해서는 적합한 전력반도체소자의 선정과 이를 고려한 전력변환회로개발 및 제어기술이 요구된다. 본고에서는 급속히 증가하고 있는 다양한 전력변환장치들의 수요에 부응하여 여러가지 목적으로 개발되고 있는 전력반도체소자를 소개한다.

전력전자기술의 응용분야는 산업전반에 걸쳐 매우 광범위하게 형성되어 있다. 정부에서 차세대 첨단 성장산업으로 지정하여 2006년까지 5년간 총 9조여원을 투입하여 집중 육성하고자 하는 6T(IT, BT, NT, ST, ET, CT)와도 밀접한 관련이 있으며 대표적인 몇가지만 예를 들면 표 1과 같다.

표 1 전력전자기술의 응용분야

기술분야	응용분야
IT (정보기술)	정보통신기기, 컴퓨터, 휴대용단말기 등의 소형경량화 고성능전원장치와 UPS
ET (환경 및 에너지 기술)	태양광발전, 풍력발전, BES(Battery Energy Storage), SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), 핵융합발전, 직류송전, 분산전원, 전기집진기, 폐기물처리, 오수처리용 전력변환장치
ST(항공우주기술)	항공기, 인공위성용 초소형 SMPS
NT(나노기술)	나노공정용 초정밀 펄스파워 전원장치
수송시스템 기	전기자동차, 고속전철, 지하철전동차, 자기부상열차, 경전철, 대형선박용 추진시스템 및 전원장치
일반산업용	제지 · 제철압연기, 용접기, 로봇, 엘리베이터, 크레인
가전용	에어컨, 전기오븐, 냉장고, 세탁기, 전기밥솥, PDP, CRT, VTR/Audio

전력반도체소자

전력용 반도체소자로는 다이오드, SCR 사이리스터, Triac, 파워트랜지스터, MOSFET, IGBT, IPM, GTO, IGCT, SIT, MCT 등이 있으며 이상적인 스위칭 특성을 추구하며 발전하고 있다. 이상적 스위치라 함은 온상태의 순전압강하 = 0[V], 오프상태의 누설전류 = 0[A], 스위칭 타임 = 0[s], 스위칭 손실 = 0[W] 인 경우를 말한다. 여기서는 최근 관심이 되고 있는 주요소자의 특성과 개발동향 및 응용분야를 중심으로 살펴본다.

MOSFET

MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)는 게이트-소스간 전압으로 드레인 전류를 제어하는 전압제어 스위치로서 파워트랜지스터와는 달리 게이트와 소스이의 입력임피던스가 매우 커서 극히 소량의 게이트전류로 스위칭이 가능한 소자이다. 스위칭 속도는 수십~수백[nsec] 정도로 빠르므로 스위칭 손실이 작아서 수백[kHz]~수[MHz]에 이르는 고주파 스위칭이 가능하여 전력반도체소자 중 가장 빠른 스위칭 특성을 갖는다. 이러한 고주파 스위

칭 능력은 전원장치의 소형경량화에 키포인트로 작용한다. 그러나 전력용량은 그다지 큰 편이 아니어서 전압용량은 최대 1000[V] 내외, 전류용량은 100[A] 정도이다. 또한 전류밀도가 낮고 순전압강하가 커서 저전압 소용량에 국한되어 컴퓨터, 정보통신기기를 포함하는 대부분의 전기전자기기에 필수적으로 사용되는 SMPS(Switched Mode Power Supply), FA 및 OA의 전력제어, 정밀 서보드라이브 등에 주로 사용된다. 특히 근래에는 이동식 전자장비의 보급이 확산됨에 따라 배터리 사용시간을 극대화하기 위해 표면실장형 MOSFET로 소자의 소형화, 저손실화를 추구하고 있다.

IGBT

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 MOSFET와 BJT(Bipolar Junction Transistor)의 장점을 결합한 일종의 하이브리드소자라 할 수 있다. 즉, MOSFET처럼 전압구동으로 턴온/턴오프되며 온상태는 BJT와 유사하여 MOSFET보다 훨씬 큰 전류용량을 갖는다. 80년대 개발된 이래 순전압강하와 스위칭손실을 줄이기 위한 기술적 진보를 거듭하여 현재 SPT(Soft Punch Through)기술 또는 Trench셀구조로 순접압강하를 10[%] 이상 개선한 제 4세대 IGBT가 시판되고 있으며 도통손실과 다이나믹 손실을 더욱 줄이기 위한 새로운 기술개발이 진행되고 있다. 시판되는 IGBT는 범용과 대전력용으로 대별되며 각각 표 2와 3에 용량이 나타나 있다. 또한 single switch, half-bridge 외에도 인버터 설계와 조립을 컴팩트하게 하기 위하여 3상 인버터의 3 pole을 하나의 모듈에 실장하고 있는데, 그림 1은 baseplate 없이 pressure contact로 열저항을 대폭 감소시킨 세미크론(www.semikron.com)의 1200V 340A × 6급 모듈 SKIM(Semikron Integrated Module)의 조립도를 나타낸다.

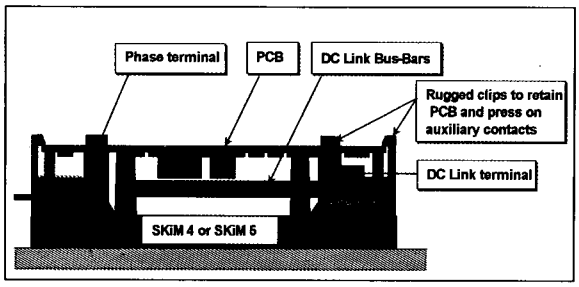


그림 1 SKIM 조립도

표 2 범용 IGBT (Half-Bridge)

V [V]	I [A]	V_{CEsat}[V]	$t_{d(on)}$ [μs]	t_r [μs]	$t_{d(off)}$ [μs]	t_f [μs]
600	50-400	1.6	0.4	0.2	0.7	0.25
1200	25-300	1.9/2.1	0.45	0.2	0.8	0.3
1400	50-300	3.0/3.1	0.25	0.5	0.35	0.5
1700	50-400	3.2/3.8	1.0	0.3	1.0	0.8

표 3 대전력용 IGBT (Single Switch)

V [V]	I [A]	V_{CEsat}[V]	$t_{d(on)}$ [μs]	t_r [μs]	$t_{d(off)}$ [μs]	t_f [μs]
1200	800-3600	2.7/3.4	0.8	0.1	1.2	0.1
1700	800-3600	3.3/4.4	1.6	2.0	2.7	0.8
2500	800-1500	2.8/3.2	1.6	2.0	2.5	1.0
3300	800-1200	3.3/3.6	1.6	2.0	2.5	1.0
4500	400-900	3.0/3.3	2.4	2.4	6.0	1.2
6500	200-600	4.3/5.3	0.75	-	5.5	-

IGBT는 게이트 구동이 간단하고, 스위칭 손실이 적고 스너버회로가 불필요하고 모듈이 절연되어 있으며 조립이 편리해서 중소용량 전력변환장치에는 거의 독보적으로 사용되고 있으며 수[MW]급 까지도 적용된다. 동작주파수는 범용의 경우 수십[kHz], 대전력용의 경우 수[kHz] 까지 가능하다. 주요 응용분야를 살펴보면, UPS, 용접기, 의료장비(CT, X-ray), 유도가열로, 태양광 및 풍력발전, 크레인, 산업용 전동기구동시스템, 대용량(전동차, 제철압연기, 탄광) 전동기구동용 인버터 및 컨버터 등이 있으며 최근 100[kV], 10[MW]급 펄스파워 전원장치에도 적용된 예가 있다. 또한 EUPEC(www.eupec.com)에서 6.6[kV], 600[A]급 IGBT 모듈을 사용하여 4.16[kV] AC-line에 적용한 3[MW]급 3-레벨 인버터를 개발하여 전동기구동에 사용하고 있다.

IPM

IPM(Intelligent Power Module)은 IGBT, 게이트 구동회로, 보호회로(과전류, 단락전류, 전원전압저하), 고장진단회로를 하나의 모듈에 내장한 것으로써, 사용하

기가 매우 간편하고 신뢰도가 높으며 장치를 소형화 하는데 큰 장점이 있다. IGBT와 용량이 비슷하여 600-1200[V], 10-800[A] 급이 범용으로 시판되고 있으며 고전압용으로 3300[V] 1200[A]급도 있다. IPM은 가격면에서 IGBT에 비해 고가인 것이 단점인데 1990년대 후반 transfer mold pakage를 개발하여 소용량 IPM의 코스트 문제를 획기적으로 개선하여 가전제품에 급속히 적용되기 시작해서 가전에서도 에너지 절감과 제품의 고성능화에 크게 기여하게 되었다. 특히 HVIC(High Voltage IC)를 내장하여 제어기의 마이크로 콘트롤러 출력신호로 별도의 절연처리 없이 바로 구동할 수 있으며 게이트 구동전원도 DC 15V의 단일전원만 필요하여 전체 시스템 구성이 매우 간단하며 설계시간도 대폭 단축되는 특징이 있다.

그림 2는 Fairchild(http://fairchildsemi.com)의 DIP-SPM(Dual In-Line Package Smart Power Module)의 단면구조와 내부회로를 나타내며 표 4는 정격 및 적용분야를 나타낸다. 용량은 220[V] 0.1~2.21[kW] 이며 스위칭 주파수는 5~15[kHz] 이다. 그림 3은 미쓰비시(www.mitsubishichips.com)의 ASIPM(Application Specific IPM)의 내부구성과 인터페이스를 나타낸다. 이것은 0.1~3.7[kW]급을 대상으로 3상 IGBT 인버터, HVIC, 센서류 외에 3상 다이오드컨버터, 회생제동기까지 내장하여 초소형, 고성능, 고효율 범용인버터용으로 개발되었다.

표 4 SPM 정격 및 적용분야

구분	Tip-SPM	Dip-SPM	Mini Dip-SPM	Tiny-SPM
정격	30~50A	10~30A	3~10A	1~3A
	2.2~4kW	1~2.2kW	0.3~1kW	100~300W
적용분야	Stand A/C. Commercial W/M Industrial Inverter	Stand A/C Room A/c Consumer W/M Running M/C Sewing M/C Inverter	Room A/C Refrigerator Consumer W/M Water pump nverter	Refrigerator Water pump A/C Fan Driver Inverter

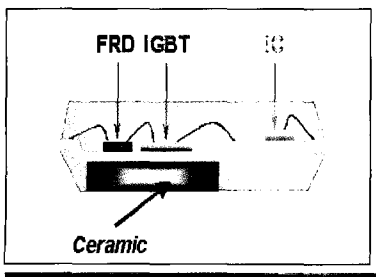
표 5 대표적인 GTO의 용량과 사양

V [V]	I [A]	V_{TM} [V]	t_{on} [μs]	t_{off} [μs]
2500	1500-3000	3	6	26
4500	600-4000	4	8	30
6000	3000-6000	6	10	30

GTO

GTO(Gate Turn-Off) 사이리스터는 게이트 전류에 의한 온/오프가 가능하며 전압, 전류용량이 크고 도통손실이 작아서 전철차량용 견인시스템, 제철압연기등 대용량 전력변환장치에 주로 사용되었다. 80년대 초 4.5[kV]/2[kA]급의 양산화를 거치면서 1994년도 6[kV]/6[kA]급이 개발되어 현재에 이르는데 표 5는 대표적인 GTO의 정격용량과 사양을 나타낸다.

그러나 GTO 사이리스터는 축적시간(Storage time)이 수십[μs] 정도로 길고 최소 온/오프시간 제약이 있어 최대 스위칭주파수가 500[Hz] 정도로 제한되는 단



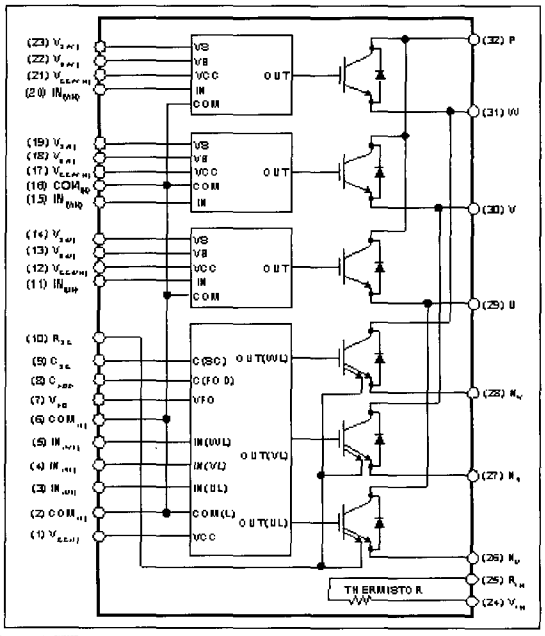


그림 2 SPM의 단면구조와 내부회로

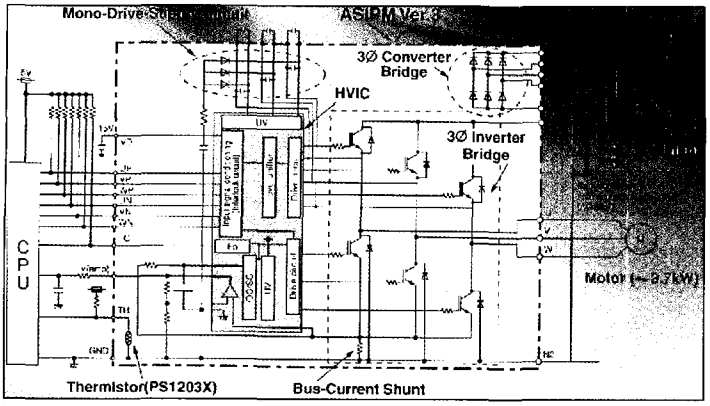


그림 3 ASIPM의 내부구성과 인터페이스

점이 있다. 또한 di/dt, dv/dt 스너버를 필요로 하며 게이트 구동전력이 크고 전류제한 능력이 없다는 결점이 있어 이를 극복하기 위한 다각적인 시도의 결과 현재 IGCT가 유력한 솔루션으로 제시되어 대용량 전력변환장치에 적용되고 있다.

IGCT

IGCT(Insulated Gate Commu- tated Turn-off) 사이리스터는 GTO 사이리스터의 턴오프게인(I_A/I_G = 3~5)을 1이 되도록 하여 애노드 전류를 순시에 게이트 회로로 전류(Commutation)시켜 턴오프하는 소자이다. 대전류 GTO의 턴오프시 축적시간(t_s)은 약 30[μs]인데 IGCT의 경우는 게이트 전류가 애노드 전류레벨까지 급속히 상승하도록 하여 1[μs] 정도 밖에 안된다. 이러한 성능을 얻기 위해서는 턴오프 게이트 전류의 스루레이트(slew rate)를 가능한 한 크게 해야 하는데 이를 위해서는 게이트 루프인덕턴스를 최소화 해야 한다. 예를 들어 4[kA] GTO의 경우 턴오프게인을 1로 하려면 턴오프 게이트전류의 스루레이트는 6[kA/μs] 이상 되어야 하고, DC 게이트 전압이 18-20[V]일 때 게이트 루프인덕턴스가 3[nH] 이하로 감소되어야 얻을 수 있는 값이다. 그런데 GTO의 게이트 루프인덕턴스는 수백[nH] 정도이므로 이를 1/100 이하로 줄이기 위해서는 GTO와 게이트 구동회로간의 독특한 결합기술이 요구된다. 그림 4는 ABB(www. abbsem.com)의 6[kV] 4[kA]급 IGCT를 나타낸다. 미쓰비시에서는 GCT(Gate Commutated Turn-off)라는 제품명을 사용한다. IGCT는 GTO에 비해 축적시간의 오차가 적어서 턴오프시 IGCT소자간의 불평형이 줄어들어 직병렬 접속이 용이하고, 스너버 없이도 동작이 가능하여 스너버 손실이 대폭 감소되며, 게이트 구동전력도 저감되어 총손실이 GTO의 약 40[%] 정도 밖에 안되는 뛰어난 장점이 있어 전동차 추진시스템, FACTS(Flexible AC Transmission System), SSB (Solid State Breakers), SVG(Static Var Generator) 등의 대용량 전력변환장치에 본격적으로 활용되고 있다. 표 6은 IGCT의 용량과 사양을 나타낸다.

표 6 대표적인 IGCT의 용량과 사양

V [V]	I [A]	V_{TM} [V]	$t_{d(on)}$ [μs]	t_r [μs]	$t_{d(off)}$ [μs]	t_f [μs]
4500	340-4000	2	3.0	1.0	11.0	1.0
6000	275-3500	4	3.0	1.5	10.0	4.0
6500	800-1500	7	3.0	2.0	3.0	1.0

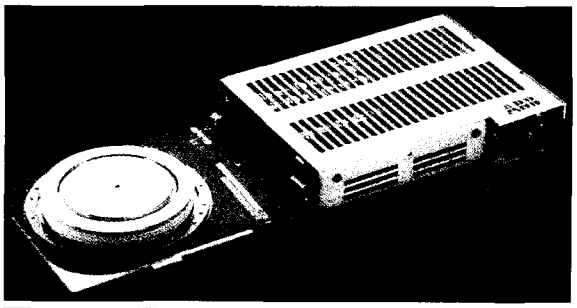


그림 4 IGCT 외형도

기 타

1) SCR

SCR(Silicon Controlled Rectifier) 사이리스터는 도통손실이 적고 신뢰도가 매우 높은 소자로서 주로 AC/DC 컨버터에 광범위하게 사용되고 있다. 전철의 변전설비, HVDC(High Voltage DC) 전력전송 등 대형 전력변환장치에 주요 소자로 활용되는 등 전력변환장치에서 기본적이고도 중요한 소자로 사용된다.

표 7은 대표적인 대용량 SCR의 사양을 나타낸다.

표 7 대표적인 대용량 SCR의 사양

V [V]	I [A]	V_{TM} [V]	t_d[μs]	t_q[μs]
6500	4200	1.73	≤3	≤800
8500	1200	2	≤3	≤600
12000	1500	4	≤10	≤1500

특히 ABB에서는 SCR 웨이퍼 4개를 멀티칩화하여 di/dt 특성을 매우 높여 펄스파워 전원장치용으로 개발하였는데 표 8에 그 사양이 나타나 있다.

표 8 펄스파워용 디바이스

V [kV]	I [kA]	t_p [μs]	t_d [μs]	di/dt [A/μs]
11.8	60	≤500	≤2	600
12	60	〃	〃	500
13.5	60	〃	〃	〃

2) Diode

다이오드도 전력변환장치의 기본소자로 용량에 관계없이 폭넓게 사용되고 있으며 범용으로는 5[kV], 5[kA]급 정도까지 주로 사용된다. 특수용도로 개발된 다이오드가 여러가지 있으나 2가지만 소개하면, 표 9는 고압 파워서플라이와 레이저용 등으로 세미크론에서 개발한 고압다이오드를 나타내고 표 10은 순전압강하가 5[kA]에서 1[V] 정도 밖에 안되는 ABB의 용접기용 다이오드를 나타낸다.

표 9 고압다이오드

V [kV]	I [A]	I_{FSM} [A]
6-180	0.35-3.5	30-240

3) MCT

MCT(MOS Controlled Thyristor)는 사이리스터의 온/오프를 MOSFET 방식으로 하여 고속 스위칭과 낮은 순전압강하 특성을 얻고자 Harris Semiconductors에서 처음 개발되었다. IGBT보다 전류밀도가 70[%] 높고 순전압강하도 50[%] 정도 밖에 안되는 뛰어난 특성이 있어 대용량 소자로서 상용화에 대한 기대가 매우 컸으나 턴오프 시간, 스너버 문제 등 몇가지 극복되지 않는 문제점으로 인하여 아직 본격적으로 적용되지는 않고 있다. 현재 SPCO(Silicon Power Corporation)에서 인수하여 GTO의 턴오프를 MOSFET로 하여 축적시간을 줄이고자 하는 MTOT(MOS Turn-Off Thyristor)를 개발하는 등 성능향상에 주력하고 있다.

표 10 용접기용 대전류 다이오드

V [V]	I [A]	V_{Fmax} [V]	I_{TSM} [kA]
200	6130-11000	1.05	45-85
400	7110-11350	1.02	55-85

4) SIT

SIT(Static Induction Transistors)는 1975년 소개된 이래 꾸준히 성능향상이 진행되어 100[kHz]로 100[kW]급에도 적용가능하며 SID(Static Induction Diode), SIMOS(Static Induction MOS Transistors) 등 Static Induction Family를 형성하며 꾸준히 개발되고 있다. SI 사이리스터는 GTO, IGBT와 경쟁하기 위해 대전력화, 저손실화, 고속화 개발이 진행되고 있다.

맺음말

전력변환장치의 효율, 성능, 용량은 주로 사용하는 소자에 의해 결정되므로 전력반도체소자는 저손실화, 고속스위칭화를 추구하며 지속적으로 발전하고 있다. 특히 신뢰도 향상, 사용의 편리성, 설계와 조립시간 단축 등의 장점이 있는 모듈화 및 여러기능의 멀티칩을 하나의 패키지에 탑재한 시스템화 기술은 더욱 폭넓게 확산될 것으로 예상된다. 21세기 주요 기반기술로 예상되는 초전도기술과 핵융합기술 등의 구현에는 기존장치의 규모를 훨씬 초과하는 초대형 전력변환장치가 필수인데 이러한 경우에는 기존 전력반도체소자의 직병렬 접속보다는 전혀 새로운 소자로 접근하는 것이 효과적일 수 있다. 따라서 새로운 재료인 SiC(실리콘카바이드)에 관한 관심이 고조되어 파워MOSFET와 사이리스터를 대상으로 개발이 진행되고 있다. SiC는 기존의 Si보다 열전도율이 3배 정도 높고 절연파괴강도는 10배나 높아서 고내압 용도로 적합한 것으로 큰 기대를 걸고 있다. 궁극적으로는 전도율과 항복전계 강도가 Si나 SiC보다 비교가 안될 정도로 높은 다이아몬드를 이용한 전력반도체소자가 개발된다면 전력전자관련 응용기술은 차원이 완전히 다른 새로운 최첨단 과학기술분야의 개척 및 발전에도 크게 기여할 것으로 전망된다.