



그림 1.  
4.5kV 모듈 FZ1200R45HL3의 패키지

## HVDC 전송 애플리케이션에 이용하기 위한 4.5kV IGBT/다이오드 칩셋

이 글에서는 산업용 애플리케이션 특히 IHV-B 패키지로 HVDC 애플리케이션에 이용하기 위한 새로운 4.5kV 트랜치 필드 스톱 IGBT 및 이미터 제어 EC 다이오드에 대해서 소개한다. 온-상태 전압이 낮고, 특히 표준적 조건을 넘어서는 높은 전압 및 높은 전류로 턴온 스위칭 동작이 신속하고, 동시에 단락 회로 성능이 뛰어나다는 점을 위주로 이 IGBT 및 다이오드의 성능을 살펴본다.

글 : Thomas Schütze, 인피니언 테크놀로지스  
www.infineon.com

인피니언의 새로운 4.5kV IGBT/다이오드 칩셋은 HVDC 애플리케이션에 이용하도록 최적화된 제품으로서, 극히 낮은 온-상태 전압 손실을 달성할 뿐만 아니라 고전류 고전압으로 턴온 동작이 신속하고 단락 회로 견고성이 뛰어나다. IGBT 및 다이오드에 HDR 기술을 적용함으로써 뛰어난 견고성을 달성한다. 4.5kV 모듈을 추가함으로써 기존에 고전압 용량으로 나와 있는 3.3kV 및 6.5kV 제품에 더해 솔루션을 더욱 다양화하게 되었다. 이 칩셋은 두 가지 하우징으로 제공된다.

첫째는 고-절연 6.5kV 모듈 하우징으로서, DC 링크 전압이 2500V~3000V에 이르는 트랙션 애플리케이션의 혹독한 환경에 이용하도록 10.2kV 절연 성능과 그에 따른 적합한 연면거리 및 공간 거리를 제공한다. 둘째는 잘 알려지고 세계적으로 널리 적용되고 있는 IHV-A 모듈의 뒤를 이은 IHV-B 하우징을 적용한 것이다. 이 모듈은 중간 전압 드라이브, 다양한 유형의 HVDC(High Voltage Direct Current), FACTS(flexible-AC-transmission-system) 애플리케이션 등의 산업용 애플리

케이션에 이용하기 위한 것이다. 이 모듈은 위 제품사진(그림 1) 같다.

앞으로의 HVDC 시스템에서는 잘 알려져 있는 사이리스터 기반 그리드 정류 고전압 DC 전송 대신에 이러한 IGBT를 기반으로 한 전압 소스 컨버터(voltage source converter: VSC)가 갈수록 더 중요한 역할을 할 것으로 보인다. IGBT 기반 솔루션의 가장 큰 장점은 IGBT의 턴온 및 턴오프 동작을 이용함으로써 유효 전류(active current)와 무효 전류(reactive current)를 독립적으로 제어할 수

있을 뿐만 아니라 AC 그리드 결합 시에 성능이 뛰어나다는 점이다.

고전압 애플리케이션을 위해서는 다수의 반도체를 직렬로 연결하고 높은 정확도로 동시적으로 스위칭해야 한다. 그러므로 이를 위해서 HVDC와 FACTS 같은 고전압 애플리케이션에 이용하기 위해서 간단한 디자인의 멀티레벨 VSC가 도입되었다. 그것이 바로 모듈러 멀티레벨 컨버터 MMC(Modular Multilevel Converter)이다. HVDC 애플리케이션에서는 개별 IGBT 모듈의 스위칭 주파수를 낮출 수 있다. 그러므로 전체적인 전력 소모를 낮추기 위해서는 낮은 온-상태 손실이 특히 중요한 요소이다.

## IGBT와 다이오드의 구조

IGBT 트렌치 기술은 셀들 사이에 캐리어 누적 효과와 최적화된 셀 간격 그리고 높은 블로킹 전압

이 가능하도록 설계된 최적화된 채널 길이 및 채널 폭을 이용함으로써 낮은 온-상태 손실을 달성한다. 그림으로써 트렌치 기술은 표준적 평면(planar) 기술과 비교해서 셀 하단에서 넓은 영역에 걸쳐서 전하 캐리어 농도에 영향을 주기가 용이하다. 그림 2에서는 4.5kV 다이오드/IGBT의 단면도를 보여준다. 두 소자 모두 에지 종단(edge termination)에 VLD(varied lateral doping) 구조를 적용하고 있다. 그림으로써 수평적 HDR 구조와 결합적으로 작용해서 스위칭 시퀀스 시에 동적 애버랜치 현상을 감소시킴으로써 IGBT로는 극히 뛰어난 턴오프 견고성을 달성하고 다이오드로는 뛰어난 정류 견고성을 달성한다.

## 전기적 성능

### 정적 특성

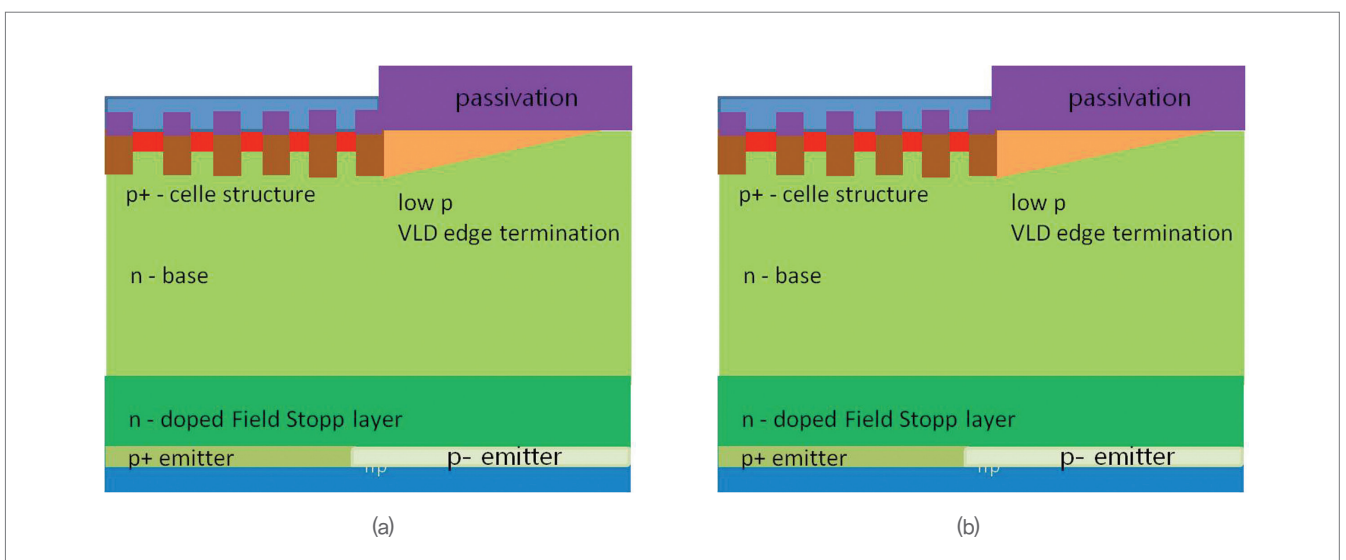
4.5kV IGBT로 낮은 온-상태 전압을 달성하기

위해서 6.5kV 디바이스 플랫폼으로부터 축적된 트렌치 기술을 적용하고 여기에 적합한 베이스 소재, 적합하게 변형된 필드 스톱 기술, 최적화된 셀 디자인을 결합함으로써 4.5kV 디바이스로서 동급 최상의 온-상태 특성을 달성하고 있다. FZ1200R45HL3 모듈의 공칭 전류인 1200A일 때, 25°C로 정격  $V_{CE(sat)}=2.35V$ , 125°C로  $V_{CE(sat)}=2.9V$ , 150°C로  $V_{CE(sat)}=3.0V$ 를 달성하고 있다. EC 다이오드는 1200A의 공칭 전류일 때 거의 중립적인 온도 계수를 나타내며  $25^{\circ}C \leq T \leq 150^{\circ}C$ 의 온도 범위로 정격 포워드 전압 강하가  $V_f \leq 2.5V$ 이다.

### 동적 특성

그림 3에서는  $V_{CE}=2.8kV$ ,  $I_C=1200A$ ,  $T=150^{\circ}C$ 의 공칭 조건일 때 스위칭 파형을 보여준다. 이러한 조건으로 150μH의 정류 인덕턴스로 매끄러운 턴오프 동작을 달성한다는 것을 알 수 있다.  $V_{CE}$ 는 3.4kV를 넘지 않는다. 더 높은 부유 인덕턴스이고

그림 2.  
HDR 및 VLD 에지 종단을 적용한 IGBT(왼쪽)와 EC 다이오드(오른쪽)의 단면도



더 높은 전류이고 최저  $-40^{\circ}\text{C}$ 에 이르는 동작 온도로 더 혹독한 조건이라 하더라도 매끄러운 턴오프를 달성한다. 정격 턴온 파형과 역 복귀 파형도 같이 보여주고 있다. 이들 파형에서는  $I_F$  테일 경사가 아주 매끄럽다는 것을 알 수 있다.

### 고전압 고전류 스위칭

HVDC 애플리케이션에서는 결합 이벤트 시에 이 결합 상황을 신속하게 검출하고 IGBT가 높은 전압 및 높은 전류로 신속하게 턴온 동작을 해야 한다. RBSOA 한계를 넘어서는 혹독한 조건으로 이 디바이스의 견고성을 평가하였다.

가장 먼저 활용할 수 있는 IGBT 파라미터는 이의 채널 폭을 활용해서 예상되는 결합 이벤트에 따라서 턴온 동작을 적합하게 할 수 있다는 것이다.

채널 폭을 늘리면 신속한 턴온 동작을 달성할 수 있으나 대신에 채널 폭이 늘어나면 단락 회로 전류가 높아짐으로써 단락 회로 가능성이 높아진다. 그러므로 턴온 동작과 단락 회로 가능성 사이에 적절한 절충점을 찾거나, 또는 아니면 IGBT의 수직 구조를 향상시킴으로써 이러한 요구들을 동시에 충족할 수 있다.

### 단락 회로 가능성

IGBT의 단락 회로 타입 1 가능성을 살펴보기 위해서  $V_{CE}=3000\text{V}$ ,  $V_{GE}=17\text{V}$ ,  $T=125^{\circ}\text{C}$ 의 혹독한 조건을 적용하였다. 공칭 전류의 거의 8배에 달하는 9500A로 스위칭하였다.

디바이스 결합이 발생하기까지 걸리는 단락 회로 시간의 한계선을 연장하도록 수직 IGBT 구조

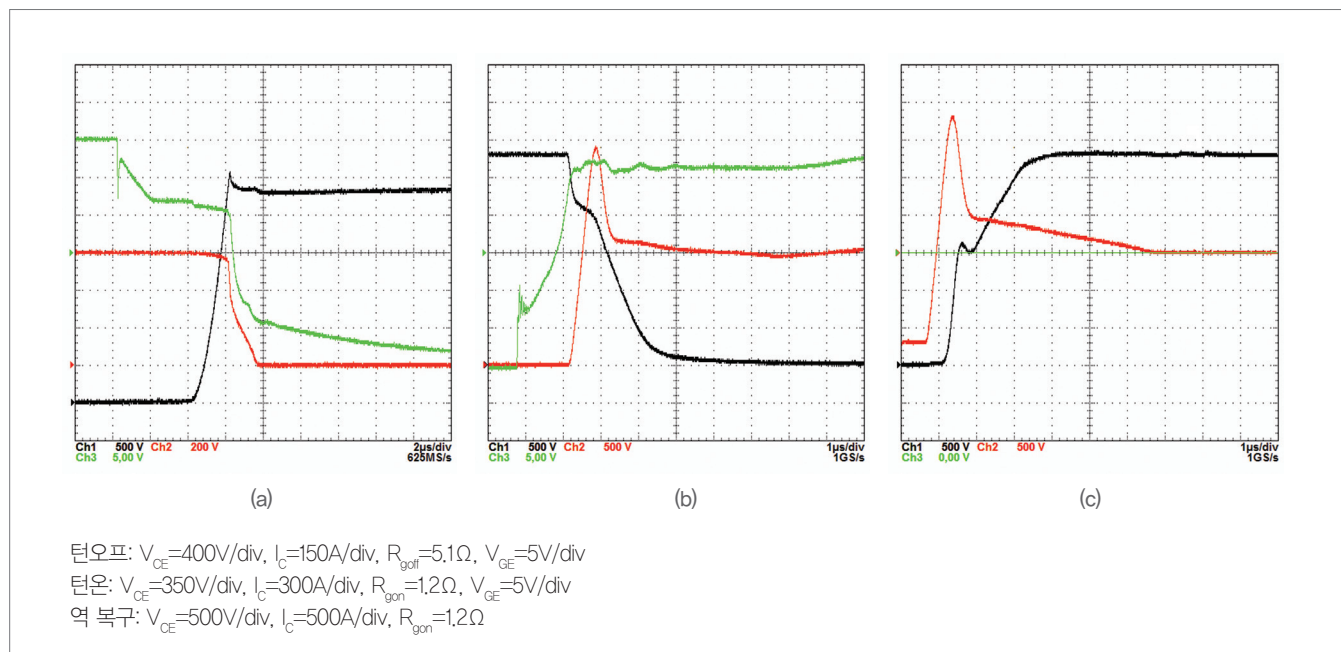
를 최적화하였다. 그림 4에서는 단락 회로 파형을 보여준다. FZ1200R45HL3 모듈로 IGBT가 이 단락 회로 이벤트를 잘 처리하고 있으며  $10\mu\text{s}$ 의 단락 회로 지속시간 후에 신뢰할 수 있는 턴오프를 달성하고 있다는 것을 알 수 있다.

### IGBT와 다이오드의 견고성

HVDC 애플리케이션뿐만 아니라 트랙션 애플리케이션에서도 마찬가지로, IGBT와 다이오드의 신속한 과전류 턴오프 동작은 시스템 신뢰성을 향상시킨다.

HDR 구조를 적용함으로써 종단(termination) 시스템은 IGBT 견고성에 영향을 미치지 않게 되고 오로지 셀 디자인에 따라서만 영향을 받게 된다. 트랜치 구조는 IGBT의 소스 길이를 추가적으로 단

그림 3.  
2800V/1200A,  $150\mu\text{H}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$ 일 때 파형



축할 수 있는 가능성을 제공한다. 전류 밀도는 소스 길이에 반비례하게 감소하므로 트랜치 IGBT의 래치업 내구성을 실제로 향상시키며 뛰어난 턴오프 견고성을 달성한다. 이 점은 전류 또는 전압 신호로 심각한 발진을 일으키지 않으면서 공칭 전류의 5배로 스위칭할 수 있다는 점으로서 설명할 수 있다.

낮은 온-상태 전압과 더불어서 또한, 이 새로운 4.5kV EC 다이오드는 낮은 동적 전력 손실과 매우 높은 견고성을 달성한다.  $P_{max} \geq 4\text{MW}$ 인 200A 공칭 전류 모듈로 다이오드 복구를 테스트하였는데 손상을 나타내지 않았다.

### 서지 전류 용량

전력 전송 라인에서 단락 회로가 발생하는 것과 같은 결함 이벤트 시에는 다이오드가 동작할 때 높은 서지 전류 같은 결함 조건이 발생할 수 있다. 그러므로 높은 서지 전류를 견딜 수 있는 능력이 모듈의 내구성에 있어서 매우 중요한 요건이다. HDR 구조와 더불어서 최적화된 수직적 디자인을 적용해서  $V_f$ 를 낮춤으로써 충분한 서지 전류 용량을 달성할 수 있다.  $I_C=1200\text{A}$ 인 모듈로 약 10kA의 정격  $I_{FSM}$  값을 달성할 수 있다. 이는 125°C 온도로 약 500kA² 및 150°C 온도로 약 460kA²의  $Q_{FSM}$ 에 해당되는 것이다.

### 우주 복사에 대한 견고성

이 4.5kV IGBT 및 이미터 제어 다이오드는 우주 복사(cosmic radiation)에 대해서 견고성이 뛰어나도록 설계되었다. 수직적 디바이스 구조는 정격 DC 링크 전압으로 낮은 전기장 강도를 나타낸다. FZ1200R45HL3 모듈이 ~3kV DC 링크 전압으로 10% 동작 시간 동안 결함 수치인 정격 FIT 비율이 100 FIT인 것으로 계산되었다.

DC 링크 전압을 차단한 안정 상태 상황뿐만 아니라 스위칭 동작 시의 우주 복사 견고성도 평가하였다. 시뮬레이션을 통해서 2kV/μs까지의  $dV/dt$ 에 대해서는 디바이스 내에서 전기장이 제한적이므로 추가적인 동적 FIT를 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

### 요약

이 글에서는 산업용 애플리케이션 특히 IHV-B 패키지로 HVDC 애플리케이션에 이용하기 위한 새로운 4.5kV 트랜치 필드 스톱 IGBT 및 이미터

제어 EC 다이오드에 대해서 소개하였다. 온-상태 전압이 낮고, 특히 표준적 조건을 넘어서는 높은 전압 및 높은 전류로 턴온 스위칭 동작이 신속하고, 동시에 단락 회로 성능이 뛰어나다는 점을 위주로 이 IGBT 및 다이오드의 성능을 살펴보았다. 또한 과전류 턴오프 시에 IGBT 및 다이오드의 견고성이 극히 뛰어나다는 점을 설명하였다. 이들 디바이스는 최대 150°C에 이르는 동작 온도로 동작할 수 있도록 설계되었다. 이러한 특성들은 HDR 기술을 이용한 6.5kV IGBT에서와 같은 트랜치 셀 디자인과 수직적 구조를 적용해서 달성할 수 있었던 것이다. **E**

그림 4.

3000V, 125°C,  $V_{GE}=17\text{V}$  일 때 단락 회로 파형 ( $V_{CE}=500\text{V/div}$ ,  $I_C=1.3\text{kA/div}$ ,  $V_{GE}=10\text{V/div}$ )

