

전력 반도체 소자(SiC/IGBT)의 동적 성능 분석 및 테스트 가이드 (Dynamic Performance Analysis of Power Semiconductors)

Application Note

서론 (Introduction)

전력 변환기는 전기에너지를 효율적으로 활용하기 위해 반드시 필요한 장치로, 산업 현장은 물론 일상생활에서도 핵심적인 역할을 합니다. 이 변환기의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소가 바로 전력 반도체 소자입니다. 수십 년간의 기술 발전을 거치며 전력 반도체는 수 볼트에서 수천 볼트, 수 암페어에서 수천 암페어까지 처리할 수 있을 정도로 진화해 왔습니다. 대표적인 전력 소자로는 MOSFET, IGBT, 다이오드 등이 널리 사용되고 있습니다.

대부분의 전력 반도체는 실리콘(Si) 기반 재료를 사용하지만, 이 기술은 이미 이론적 한계에 가까워 전력 변환기 개발의 핵심 제약으로 지적되고 있습니다. 반면 SiC 소자는 더 높은 스위칭 속도와 접합 온도에서 동작할 수 있으며, 동시에 고전압·고전류를 처리할 수 있습니다. 이러한 특성은 변환기의 성능을 크게 향상시키고, 높은 효율·고전력 밀도·시스템 비용 절감 등을 가능하게 합니다.

SiC 소자는 자동차 구동 인버터, 전기차 온보드 충전기, 충전 스테이션, 태양광 인버터, UPS, 에너지 저장 장치, 산업용 전원 등 다양한 분야에 적합합니다. 현재 국내외 SiC 산업 생태계도 빠르게 성숙하고 있으며, 주요 제조사들은 SiC 기반 제품을 지속적으로 출시하고 있습니다. 비용은 점차 낮아지는 반면 적용 분야는 폭발적으로 확대되는 추세입니다.

1. 테스트 요구사항

전력 반도체의 동적 파라미터 테스트(예: 더블 펄스 테스트)는 스위칭 특성을 평가하는 데 핵심적인 방법입니다. 이를 통해 실제 동작 환경을 모사하여 주요 동적 파라미터를 확인하고, 잠재적인 위험 요소와 개선 방향을 파악할 수 있습니다. 특히 SiC와 GaN 같은 3세대 반도체 기술이 빠르게 발전하면서 신에너지 및 전원 산업에 혁신을 가져오고 있지만, 동시에 엔지니어들에게 더 높은 수준의 테스트 과제를 제시하고 있습니다.

1.1 테스트 목적

- 핵심 동적 파라미터 측정**
 스위칭 손실, 스위칭 시간, 역회복 특성 등을 측정하여 시스템 효율을 최적화하고, 소자의 응답 속도를 평가하며, 전환 과정에서 안전 마진을 확인합니다.
- 구동 회로 설계 검증**
 게이트 저항의 적정성을 평가하고, 구동 신호의 상승/하강 기울기를 최적화하여 스위칭 진동을 줄이며, 보호 기능의 효과를 테스트합니다.
- 소자 성능 비교**
 다양한 전압, 전류, 온도 조건에서 테스트하여 재료(Si IGBT vs SiC MOSFET) 또는 제조사 간 성능을 비교하고, 소자 선택을 지원합니다.
- 기생 파라미터 영향 분석**
- 극한 조건에서의 신뢰성 평가**

1.2 테스트 원리

하단에 그림 1에 표시된 것과 같이, SiC MOSFET을 예로 들어 설명합니다. 더블 펄스 테스트 회로는 버스 커패시터(C_{Bus}), 테스트 대상 스위치 튜브(Q_L), 동반 다이오드(V_{DH}), 구동 회로 및 부하 인덕터(L)로 구성됩니다. 테스트 중에 Q_L 에 더블 펄스 구동 신호를 전송하면 지정된 전압 및 전류 조건에서 스위칭 특성을 측정할 수 있습니다.

실제 전력 변환기는 MOS-다이오드 및 MOS-MOS의 두 가지 전류 전환(Commutation) 모드에서 작동합니다. 펄스 테스트는 실제 변환기와 동일한 전류 전환 모드 및 소자를 채택해야 합니다.

MOS-MOS 모드의 경우, 다이오드 V_{DH} 를 SiC MOSFET Q_H 로 교체하고 테스트 내내 셋다운 신호(Shutdown Signal)를 인가합니다.

다이오드 역회복 특성을 테스트할 때, 하단 스위치(Q_L)는 부하 인덕터 LL이 병렬로 연결된 테스트 대상 소자이며, 상단 스위치(Q_H)는 턴온 및 턴오프 동작을 수행하는 동반 소자 역할을 합니다(그림 2 참조).

테스트 전반에 걸쳐 Q_L 은 두 번의 턴온 및 턴오프 사이클을 거쳐 두 개의 펄스를 형성합니다.

V_{GS} , V_{DS} , I_{DS} 파형을 캡처하고 유지함으로써 첫 번째 턴오프 및 두 번째 턴온 이벤트 동안의 동적 성능을 분석하고 평가할 수 있습니다.

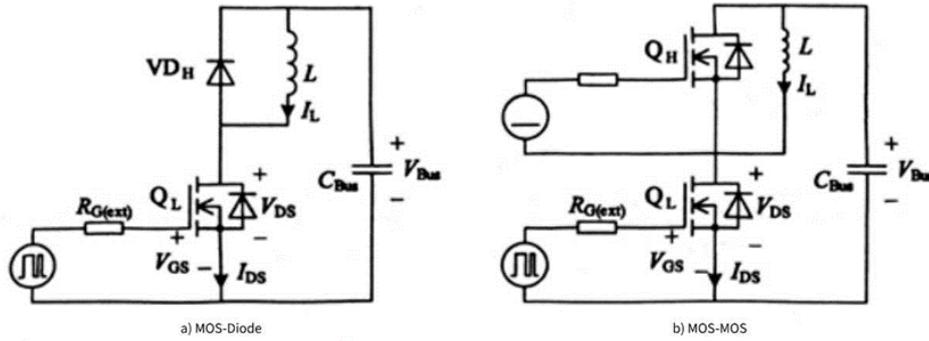


그림 1. 더블 펄스 테스트 회로

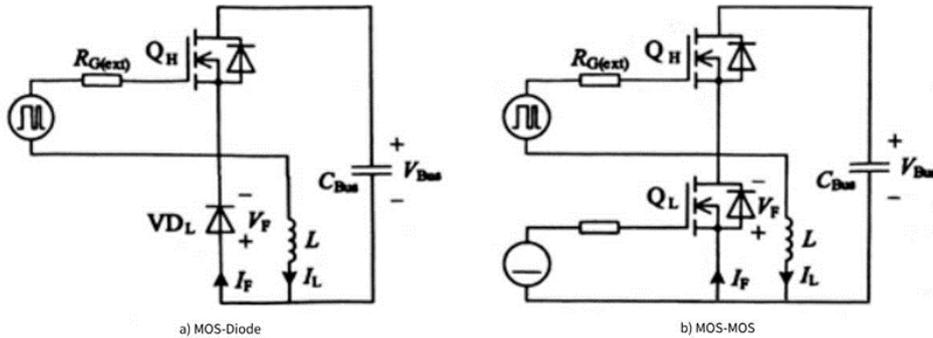


그림 2. 다이오드 역회복 테스트 회로

1.3 대표적 적용 사례

- 전기차 구동 시스템: 인버터에서 IGBT/SiC 모듈의 스위칭 손실과 열 안정성 검증
- 재생에너지: PV 인버터 및 PCS에서 고주파 스위칭 시 소자 신뢰성 테스트
- 산업용 인버터: 모터 드라이브 회로에서 동적 응답과 전압 스트레스 평가
- 스위칭 전원: 고주파 DC-DC 컨버터의 효율 및 EMI 특성 최적화

2. 테스트 플랫폼 구성

테스트 솔루션은 단일 펄스, 더블 펄스, 멀티 펄스 측정을 지원하며, 오실로스코프, 신호 발생기, 저전압/고전압 DC 전원, 전압·전류 프로브, 전용 소프트웨어를 통합합니다.

측정 항목에는 턴오프 지연, 하강 시간, 턴오프 시간, 턴오프 손실, 턴온 지연, 상승 시간, 턴온 시간, 턴온 손실, 역회복 시간, 역회복 전류, 역회복 전하, 역회복 에너지, dv/dt , di/dt 등이 포함됩니다.

- DG5000 Pro는 더블 펄스 구동 신호를 생성합니다.
- 광학적으로 절연된 프로브(Optically isolated probe)는 스위칭 소자의 게이트 전압(V_{GS})과 동반 소자의 게이트 크로스토크(Crosstalk) 신호를 정확하게 측정합니다. 게이트 전하 측정에도 사용할 수 있습니다.
- MHO5106 오실로스코프는 전압 및 전류 파형을 캡처하고 필요한 계산을 수행합니다.

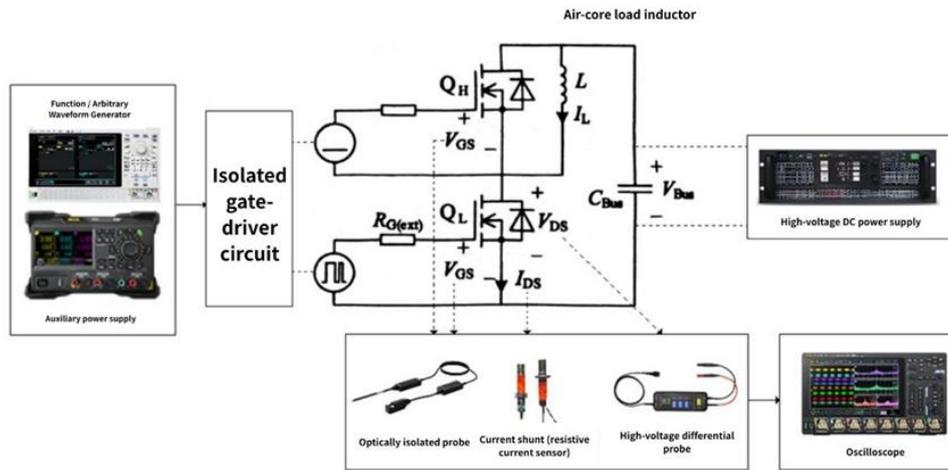


그림 3. 더블 펄스 테스트 플랫폼 아키텍처



그림 4. 더블 펄스 테스트 시스템



그림 5. Fall-time test (Toff)



그림 6. Turn-off 에너지 손실(Eoff)

3. 솔루션 특징

- IGBT, MOSFET을 비롯해 3세대 전력 반도체인 SiC 및 GaN 소자의 동적 특성을 안정적이고 반복 가능하게 측정할 수 있습니다.
- 측정 가능한 파라미터는 턴온-턴오프 특성, 스위칭 전이(Transition), 역회복 특성, 게이트 구동, 스위칭 손실 등 다양한 항목을 포함합니다.
- 고객 요구에 맞춘 커스텀 테스트 픽스처(Test Fixtures)를 지원합니다.
- RIGOL 오실로스코프 및 프로브와 연동하여, 프로브의 시간 지연을 정밀하게 보상하고 전용 스위칭 손실 알고리즘을 적용해 신뢰도 높은 측정 결과를 제공합니다.
- 최대 1GHz 대역폭과 180dB 공통 모드 제거비(CMRR)를 갖춘 독자적인 광학 절연 프로브를 통해 실제 구동 신호를 정확하게 측정할 수 있습니다.

4. 솔루션 구성

장비	주요 사양	장점
DHO5000 / MHO5000 시리즈 (디지털 오실로스코프)	<ul style="list-style-type: none"> • 6 / 8 채널 • 1 GHz 대역폭 • 4 GSa/s 샘플링 속도 • 500 Mpts 메모리 깊이 	스위칭 소자의 Vgs, Vds, Id 뿐만 아니라 동반 소자의 게이트 크로스토크, Vds, Id 를 포함한 여러 신호를 동기적으로 캡처하며, 장시간 파형 기록과 고정밀 트리거링을 지원합니다.
PIA1000 (광 절연 프로브)	<ul style="list-style-type: none"> • 최대 1GHz 대역폭 • 최대 180 dB CMRR • 선택 가능한 차동 모드 전압 범위: 최대 ± 2500 V 	그라운드 루프 간섭을 제거하고, 상단 스위치 Vgs, 상단 스위치 크로스토크, 게이트 드라이브 전압과 같은 작은 신호를 정확하게 부유 측정할 수 있도록 합니다.
DG5000Pro (함수/임의 파형 발생기)	<ul style="list-style-type: none"> • 임의의 펄스 폭을 가진 단일 채널 다중 펄스 출력 • 제어 가능한 데드 타임(Dead-time)을 가진 이중 채널 다중 펄스 출력 	독창적이고 사용자 친화적인 UI 는 원하는 펄스 폭으로 멀티 펄스 신호를 빠르게 생성할 수 있도록 합니다.

<참고문헌>

Rigol - Dynamic Performance Analysis of Power Semiconductors

Application Notes ANW01100-1220-0032