

## CoolSiC™ SiC MOSFET: 3상 전력 변환을 사용한 브리지 토폴로지에 적합한 이유



이 글에서는 배터리 충전이나 서보 드라이브 애플리케이션에 사용되는 브리지 토폴로지에 SiC MOSFET을 사용하는 것에 대해서 설명한다. SiC는 1200V 대로 Si IGBT에 비해서 동적 손실이 상당히 감소할 수 있음으로 시스템 차원에서 손실을 크게 낮출 수 있다.

글 / Dr. 패니 뷔요크(Fanny Björk), Senior Specialist, Dr. 지후이 원(Zhihui Yuan),  
Technical Marketing Manager, 인피니언 테크놀로지스

## 요약

전력 변환 성능을 향상시키고 시스템 혁신을 이루기 위해서 SiC MOSFET을 찾는 시스템 디자이너들이 갈수록 늘어나고 있다. 이 글에서는 배터리 충전이나 서보 드라이브 애플리케이션에 사용되는 브리지 토폴로지에 SiC MOSFET을 사용하는 것에 대해서 설명한다. SiC는 1200V 대로 Si IGBT에 비해서 동적 손실이 상당히 감소할 수 있으므로 시스템 차원에서 손실을 크게 낮출 수 있다. SiC MOSFET은 성능을 중요하게 요구하는 디자인에 적합하다. 특히 Si 디바이스와 달리, 밀러 커패시턴스와 임계 전압이 동적 손실을 낮출 수 있도록 중요한 역할을 한다. 이것은 전력 변환 성능에 영향을 미치며, 양방향 충전으로 배터리 전력을 수퍼커패시터로 절약하거나 인버터를 서보 모터에 통합하는 것을 가능하게 한다.

## 머리말

오늘날 전력 애플리케이션 시장의 메인은 효율, 생산성 및 법적 규제이다. 더 적은 에너지로 더 많은 일을 하고 에너지 비용을 조금이라도 더 아끼기 위해서 변환 효율과 시스템 소형화 및 경량화가 중요해지고 있다. 에너지 믹스로 재생 에너지 비중이 늘어나는 한편으로, 전기를 생산하고, 전송하고, 소비하는 전체적인 전기 에너지 공급망을 따라서 전력 반도체가 중요한 역할을 하고 있다. 최신 세대의 Si MOSFET과 IGBT가 대부분의 경우에 여전히 훌륭한 솔루션을 제공하나, 와이드 밴드갭 소재인 SiC와 GaN을 채택한 트랜지스터는 새로운 목표와 요구를 충족할 수 있도록 새로운 차원의 설계 유연성을 제공한다. 인피니언은 실리콘 기반의 우수한 솔루션과 더불어서 와이드 밴드갭 기술을 추가하고 있다. 최근에는

TO247 패키지로 다양한 종류의 1200V CoolSiC™ SiC MOSFET 제품을 추가했다. 3상 전력 변환용으로 Si를 사용하던 것에서 SiC로 전환이 이루어지고 있다. 이 글에서는 배터리 충전이나 서보 드라이브에 사용되는 브리지 토폴로지로 SiC MOSFET을 어떻게 활용할지 설명한다.

## Si에서 SiC로 전환

1200V 정격 SiC MOSFET은 여러 측면에서 차세대 Si 기술을 대체할 만한 이점들을 제공한다. 가장 두드러진 특징은, 1200V Si IGBT에 비해서 동적 손실이 낮다는 것이다. 전도 모드로 소수 캐리어가 없으므로 테일 전류를 제거하고, 그러므로 매우 낮은 턴오프 손실이 가능하다. 턴온 손실 또한 IGBT에 비해서 낮다. 이것은 주로 바디 다이오드의 역회복 손실이 낮고 그래서 턴온 전류 피크가 낮기 때문이다. 두 손실 모두 온도에 따라서 증가하지 않는다. 그런데 IGBT와 달리, MOSFET은 턴온 손실이 주로 차지하고 턴오프 손실은 낮다. IGBT는 이와 반대다.

또 다른 특징은, 1200V 대의 SiC MOSFET이 650V 대의 Si 수퍼정션 MOSFET과 같은 스위칭 성능을 제공한다는 것이다. SiC MOSFET은 낮은 손실 바디 다이오드를 특징으로 하므로 하드정류에 매우 적합하다. 갑작스러운 동작을 일으키는 수퍼정션 디바이스 구조가 없기 때문이다. 지금까지는 650V 정격 디바이스를 사용해서 단상 전력 변환으로만 가능했던 토폴로지와 솔루션이 3상 전력 변환으로 더 높은 버스 전압으로 가능하게 되었다.

## 손실은 크게 감소

SiC MOSFET 기술이 이론적으로 약속하는 낮은 동적 손실을 달성하기 위

해서는 특정한 디바이스 설계 파라미터들을 최적화해야 한다. 밀러 커패시턴스  $C_{dg}$ 를 통해서 용량성 피드백으로부터의 게이트 전압 상승으로 인해서 발생하는 기생 턴온 효과로 인해서 동적 손실이 높을 수 있다. MOSFET이 오프 상태이고 역평행 다이오드가 턴오프되어 있을 때 기생 턴온 현상이 발생된다. 만약 발생한 게이트 전압이 디바이스의 게이트 임계 전압보다 높으면, 쏫 쓰루 이벤트가 발생된다. 쏫 쓰루와 그로 인한 에너지 손실의 정도는 동작 조건과 하드웨어에 따라서 달라진다. Sobe 외 저자들이 설명한 바와 같이<sup>[1]</sup>, 높은 버스 전압, 빠른  $dv/dt$  스위칭 트랜젠트, 턴온 시의 낮은 게이트 저항, 턴오프 시의 높은 게이트 저항 같은 것들을 중요하게 고려해야 한다. MOSFET 커패시턴스 비  $C_{dg}/(C_{dg}+C_{gs})$ 와 게이트 임계 전압  $V_{gs,th}$ 를 보면 원치 않는 현상에 대한 MOSFET의 취약성을 예측할 수 있다.

그림 1에서는 시중에 출시되어 있는 최신 세대 SiC MOSFET의 데이터시트 비교로서, 밀러 커패시턴스로 인해 발생한 게이트 전압과 게이트 임계 전압에 있어서 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 600V의 버스 전압  $V_{oc}$ 를 사용하는 경우에, 기생 턴온(PTO) 효과에 대해서 근본적인 내성을 제공하는 업체는 둘 뿐이다. 다시 말해서 게이트 임계 전압과 유도 전압을 잘 조화시키고 있다는 뜻이다.

인피니언의 CoolSiC™ MOSFET이 커패시턴스와 유도 전압이 가장 낮다고는 할 수 없다. 하지만  $C_{dg}$ 가 낮을수록 디바이스의 스위칭 속도를 제어하기가 어려워진다. 그러므로 PTO 내성과 제어 용이성 사이에 최적의 절충점을 찾는 것이 중요하다. 그러므로 고속 스위칭 시에 원치 않는 기생 턴온 손실을 최소화하기 위해서는 4V 이상의 지극히 높은 수준의 임계 전압이 중요하다. 인피니언의 평가

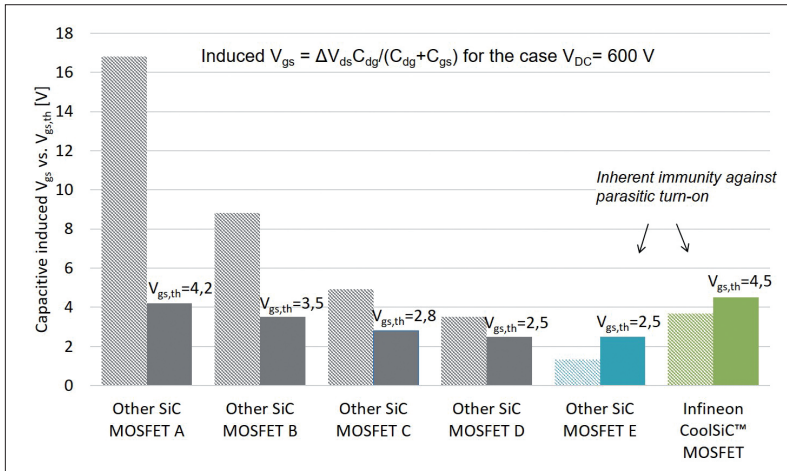


그림 1. 데이터시트에 표기된 정격 V<sub>gs,th</sub>에 대해서 용량성 유도 게이트 전압 상승으로 인한 원치 않는 기생 턴온 취약성 비교. 많은 1200V SiC MOSFET이 공칭 온(on) 상태 저항이 60~80mΩ에 이른다.

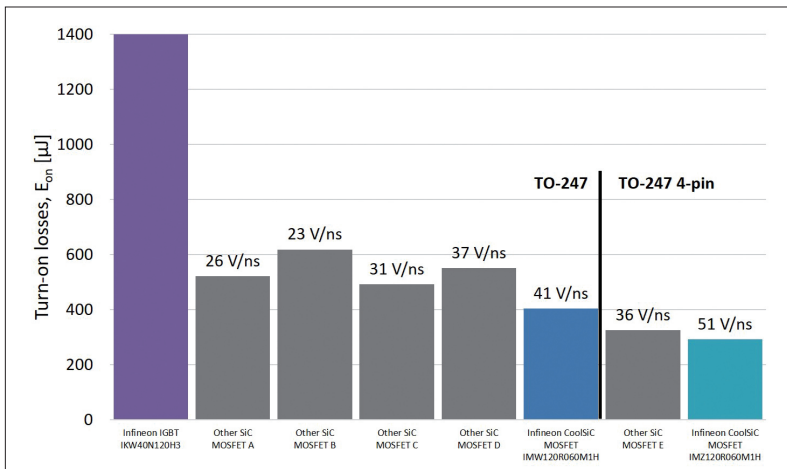


그림 2. 0V 턴오프 게이트 전압으로 달성 가능한 최소 턴온 스위칭 손실과 수반되는 dv/dt 스위칭 트랜션트. 인피니언의 이중 펄스 평가 보드<sup>[2]</sup>로 시중에 출시된 60~80mΩ SiC MOSFET을 사용해서 측정했다. CoolSiC™ MOSFET이 양쪽 TO247 패키지 모두로 손실이 가장 낮다는 것을 알 수 있으며, 이것은 기생 턴온 에너지 손실에 대해서 내성이 높다는 것을 뜻한다. 테스트 조건은 800V, 15A, 150°C였다.

보드를 사용해서 턴온 스위칭 손실을 측정했다<sup>[2]</sup>. 800V, 15A, 150°C 조건으로 게이트로 0V 턴오프 및 4.7Ω 동작으로 다양한 SiC MOSFET 디바이스로 달성 가능한 최소 턴온 스위칭 에너지를 측정했다. 턴온 게이트 전압은 해당 데이터시트의 권장 전압을 사용했다. 다시 말해서 +15V~+20V였다. 비교 기준으로서 인피니언의 고속 스위칭 최적화 1200V Si IGBT 디바이스도 포함시켰다.

CoolSiC™ MOSFET은 40V/ns 이상의 빠른 스위칭 트랜션트를 달성할 수 있다. 이것은 기생 턴온에 대해서 내성이 높다는 것을 뜻한다. 측정된 SiC MOSFET들 중에서 턴온 에너지 손실이 가장 낮으며, 고속 스위칭 IGBT 디바이스에 비해서는 턴온 손실을 80퍼센트까지 줄인다. 측정된 디바이스들의 에너지 손실이 그림 1에서 기생 턴온 취약성 예측과 1:1로 대응하지는 않는다. 무엇보다

도 그림 1에서는 600V의 한 가지 전압 조건으로 계산했다. 스위칭 동작 시에는 낮은 전압으로 커패시턴스 값과 내부적 게이트 저항 역시도 결과적인 스위칭 에너지에 영향을 미친다. 둘째, 용량성 턴온은 dv/dt 트랜션트를 늦추며, 이 때도 역시 내부적 프리휠링 다이오드의 복구 전류가 영향을 미친다.

또 한 가지 짚고 넘어갈 점은, 다수의 디바이스들로 스위칭 트랜션트는 보통인데 결과적인 턴온 손실 감소가 고속 스위칭 IGBT에 비해서 여전히 매우 크다는 것이다. 이것은 1200V 대의 MOSFET 디바이스를 사용할 때의 놀라운 성능을 확인시켜준다. 또한 그림 2에서는, 켈빈 소스 핀을 추가한 TO247 4핀 패키지가 50V/ns 이상으로 3핀 패키지에 비해서 훨씬 더 빠른 dv/dt로 동작한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 15A 테스트 전류 조건으로 스위칭 에너지를 10퍼센트 이상 낮춘다. 더 높은 전류이면 4핀 패키지로 손실 감소 폭이 더 커질 것이다. 추가적인 시그널 소스 핀을 사용하고 리드 인덕턴스로 전압 강하를 거의 제거하기 때문이다.

## 안전하게 동작하는 게이트 구동 방식

SiC MOSFET으로 기생 턴온 효과는 동적 손실에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 게이트 산화막 신뢰성에 있어서 중요한 것으로서 최대 게이트 전압 정격과 관련해서 안전한 동작에도 영향을 미친다. 음의 게이트 전압 전원을 사용해서 기생 턴온 효과를 억제할 수 있다. 그런데 많은 경우에 디바이스 데이터시트에서 정하고 있는 최대 음의 게이트 전압에 대해서 마진이 불충분한 문제가 있을 수 있다. 다시 말해서 결함 전압이 한계를 넘을 수 있는 것이다. 그림 3은 이러

한 상황을 보여준다.

용량성 결합으로 인한 전압이 턴오프 게이트 전압과 함께 언더슈트 전압을 발생시킨다. 그림 1과 그림 2에서는 TO247을 사용한 CoolSiC™ MOSFET이 빠른 dv/dt로 스위칭할 수 있고 어떠한 심한 기생 턴온 및 언더슈트 전압을 발생시키지 않고 손실이 낮다는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 CoolSiC™ MOSFET은 성능(가장 낮은 동적 손실)을 위해서뿐만 아니라 데이터시트의 한계 이내로 안전하게 동작하기 위해서도 적합하다. 게이트-드레인 커패시턴스를 최소화하도록 신중하게 설계된 PCB 레이아웃이라고 했을 때, 인피니언은 전원장치 디자이너들이 CoolSiC™ MOSFET을 0V 턴오프 전압으로 작동할 것을 권장한다. 그러면 성능을 희생하지 않으면서 단순한 유니폴라 게이트 구동을 사용할 수 있다.

### 차세대 서보 드라이브로 80% 손실 감소

산업용 로봇이나 자동화에 사용되는 서보 드라이브 시스템은 높은 성능과 컴팩트한 인버터를 요구하므로, SiC MOSFET의 성능을 유리하게 활용할 수 있는 대표적인 애플리케이션이다<sup>[4]</sup>. 가속, 정속, 제동 모드를 비롯한 모든 동작 모드로 전도 손실과 스위칭 손실을 낮출 수 있다. 정속 모드일 때는 모터가 통상적으로 낮은 토크, 다시 말해서 낮은 전류로 동작하는데, 이 모드가 전체 동작 시간의 90퍼센트 이상을 차지한다. 이 모드일 때 SiC MOSFET을 사용해서 Si IGBT에 비해서 총 손실을 80퍼센트까지 낮출 수 있다(그림 4). 이렇게 손실이 감소되는 것은 동적 손실이 감소할 뿐만 아니라 무류 전압이 필요 없는 저항성 출력 특성에 의해서 전도 손실이 감소되기 때문이다.

가속 모드와 제동 모드일 때는 드라

이브가 훨씬 더 높은 전류로 동작한다. 이들 모드로도 5V/ns의 동일한 dv/dt로 Si IGBT에 비해서 동적 손실을 최대 50퍼센트까지 낮출 수 있다. 반도체 손실이 80퍼센트 감소된 것을 활용해서 서보 드라이브로 펄스 전류 용량을 높일 수 있고, 그러므로 크기를 더 컴팩트하게 만들고(또는 동일한 프레임으로 더 높은 전류 제공), 팬이나 히트싱크를 줄이고, 인버터를 모터로 통합할 수도 있다. 통상적으로 사용되는 B6 토폴로지로 하드 스위칭 동작과 관련해서, SiC

MOSFET이 동적 손실을 낮추고, 심한 기생 턴온을 발생시키지 않고, 하드 정류용으로 견고한 내부적 바디 다이오드를 포함한다는 점을 활용해서 애플리케이션 성능을 향상시킬 수 있다.

### 배터리 충전기로 전력 밀도 및 효율 향상

3상 전원장치를 사용한 급속 DC 배터리 충전은 사용자들의 주행거리 불안감을 줄임으로써 전기차(EV) 시장으로

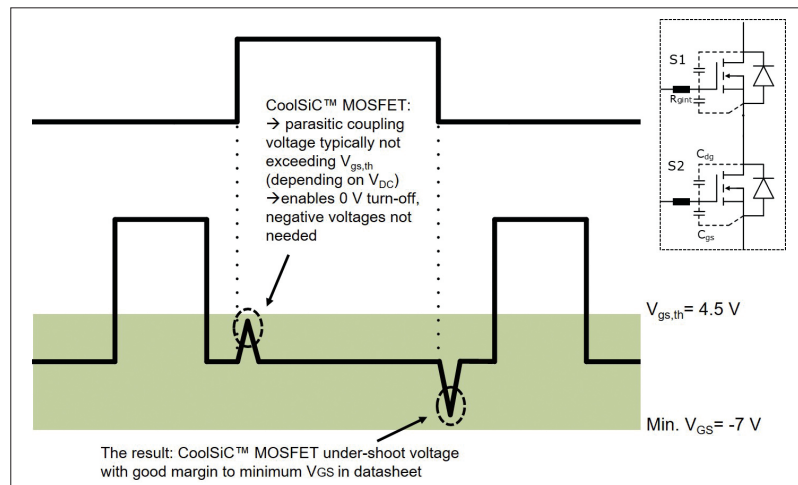


그림 3. 용량성 결합 전압과 관련한 턴온 및 언더슈트 전압을 보여준다. 이들 파라미터는 IMZ120R060M1H 제품 데이터시트에서 가져온 것이다[3].

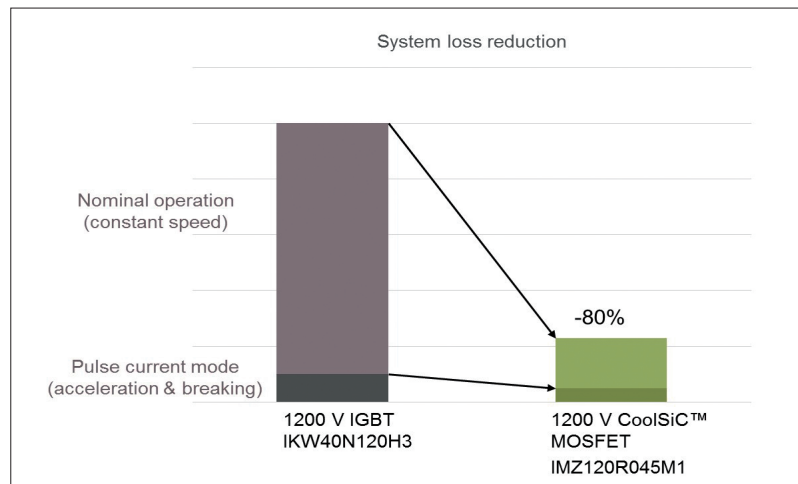


그림 4. 서보 드라이브 인버터로 모든 동작 모드에 걸쳐서 시스템 손실 감소. 2레벨 B6 토폴로지로 45mΩ 정격 1200V CoolSiC™ MOSFET을 40A 정격 1200V Si IGBT와 비교했다.

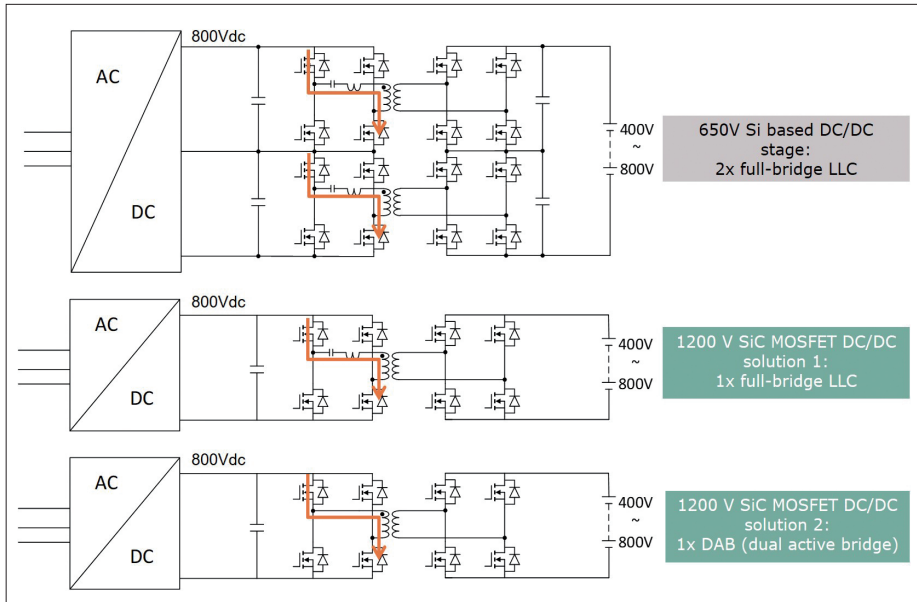


그림 5. 이차 측으로 양방향 기능을 포함한 3상 급속 DC 배터리 충전. Si 기반 솔루션과 1200V 정격 SiC MOSFET을 사용한 솔루션 비교. SiC MOSFET을 사용하면 턴온 전류 경로로 스위치 위치를 줄임으로써 전도 손실을 50퍼센트 줄일 수 있다.

판도를 바꿔놓을 것으로 기대된다. 에너지 저장 솔루션으로 양방향 충전 또한 부상하고 있다. EV 충전이나 여타 용도로 태양광 패널 같은 지속가능한 에너지원을 사용할 수 있는 장소들로 점점 충전 설비가 확충되고 있다. 최신 배터리 충전기는 DC-DC 스테이지로 소프트 스위칭 LLC 토폴로지를 사용한다. 그림 5에서 맨 위 그림이다(사용자 애플리케이션으로 양방향 충전이 필요하지 않으면, 이차측 스위치 위치에 다이오드를 사용할 수 있다). 충분히 낮은 동적 손실은 650V 정격 Si 디바이스로만 가능하므로, 800V DC 링크 전압을 지원하기 위해서는 2개의 연쇄적으로 연결된 LLC 풀브리지기가 필요하다.

1200V 정격 SiC MOSFET을 사용하면 드라이버 IC를 포함한 스위치 위치 수를 절반으로 줄일 수 있다(그림 5에서 가운데 그림). 부품 수를 50% 줄이고 그러므로 보드 공간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 효율을 극대화할 수 있다. SiC

MOSFET 솔루션의 경우에는, 온 상태일 때 2개 스위치 위치만 턴온한다. 이와 비교해서 650V 솔루션은 4개 스위치 위치를 턴온한다. 오늘날 Si 기반 시스템은 시스템 효율이 대략 97%에 이르는데, SiC MOSFET은 전도 손실을 50퍼센트 낮추고 더 낮은 출력 커패시턴스로 턴오프 스위칭 손실을 낮춤으로써 1퍼센트 더 높은 효율을 달성할 수 있다. 그러면 양방향 충전의 경우에 2퍼센트 이상의 배터리 전력을 절약할 수 있다.

1200V SiC MOSFET의 낮은 스위칭 손실에 하드 정류에 적합한 고속 바디 다이오드를 결합함으로써 듀얼 능동 브

이션을 위해서도 유용한 솔루션을 제공한다. 하드 스위칭과 소프트 스위칭 토폴로지로 CoolSiC™ MOSFET을 사용해서 효율을 높이고, 부품 수를 줄이고, 시스템 복잡성을 낮출 수 있다. CoolSiC™ MOSFET은 원치 않는 기생 턴온 효과에 대해서 내성이 뛰어나다. 그러므로 SiC MOSFET들 중에서 동적 손실이 가장 낮고, 데이터시트 한계 이내로 안전하게 동작하도록 수월하게 설계할 수 있고, 0V 턴오프 게이트 전압을 가능하게 한다. 그러므로 성능을 떨어트리지 않으면서 단순한 유니폴라 게이트 구동을 사용할 수 있다. **es**

리지 같은 전통적인 하드 스위칭 솔루션도 가능하다(그림 5 맨 아래 그림). 제어가 훨씬 단순하고, 전반적인 복잡성을 낮추고, 부품 수를 줄이기 때문에 이러한 솔루션이 점점 인기를 끌고 있다.

## 맺음말

TO247 패키지를 채택한 1200V CoolSiC™ MOSFET 포트폴리오는 서버 드라이브 같은 기존 애플리케이션뿐만 아니라 배터리 충전 인프라나 에너지 저장 솔루션 같은 부상하는 애플리케이션

## 참고문헌

- [1] K. Sobe et al, "Characterization of the parasitic turn-on behavior of discrete CoolSiC™ MOSFETs", PCIM Europe 2019, Nuremberg, Germany, 2019
- [2] <https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval-igbt-1200v-247>
- [3] [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IMZ120R060M1H-DS-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d46269e1c019016a92fdba796693](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IMZ120R060M1H-DS-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d46269e1c019016a92fdba796693)
- [4] <https://wirautomatisierer.industrie.de/messe/sps-ipc-drives/beckhoff-zeigt-dezentrales-servoantriebssystem-amp8000/>