

# GaN FET 기반의 10kW 단상 스트링 인버터의 설계 고려 사항

에너지 지속 가능성과 보안에 대한 우려가 커지면서 에너지 저장 시스템, 특히 주거용 태양광 설치에 대한 수요가 빠르게 늘어나고 있다. 시중에는 최대 2kW의 전력을 지원하는 에너지 저장 시스템이 통합된 마이크로 인버터가 있으며, 더 높은 전력이 필요한 경우에는 에너지 저장 장치가 결합된 스트링 인버터나 하이브리드 스트링 인버터를 활용할 수 있다.

글 | Riccardo Ruffo와 Vedatroyee Ghosh, Texas Instruments

에너지 지속 가능성과 보안에 대한 우려가 커지면서 에너지 저장 시스템, 특히 주거용 태양광 설치에 대한 수요가 빠르게 늘어나고 있다. 시중에는 최대 2kW의 전력을 지원하는 에너지 저장 시스템이 통합된 마이크로 인버터가 있으며, 더 높은 전력이 필요한 경우에는 에너지 저장 장치가 결합된 스트링 인버터나 하이브리드 스트링 인버터를 활용할 수 있다.

그림 1은 하이브리드 스트링 인버터의 블록 다이어그램이다. 하이브리드 스트링 인버터는 공통 조정 DC 버스를 중심으로 여러 블록을 상호 연결해 구성된다. 주요 블록은 다음과 같다.

- 최대 전력 지점 추적을 수행하기 위한 단방향 DC/DC 컨버터
- 둘째, 배터리 충·방전을 위한 양방향 DC/DC 컨버터로, 이를 통해 야간이나 정전 시에도 전원 공급이 가능하다.
- DC를 AC 전력으로 변환하고 저전류 THD(총 고조파 왜곡)를 유지하는 DC-AC 컨버터

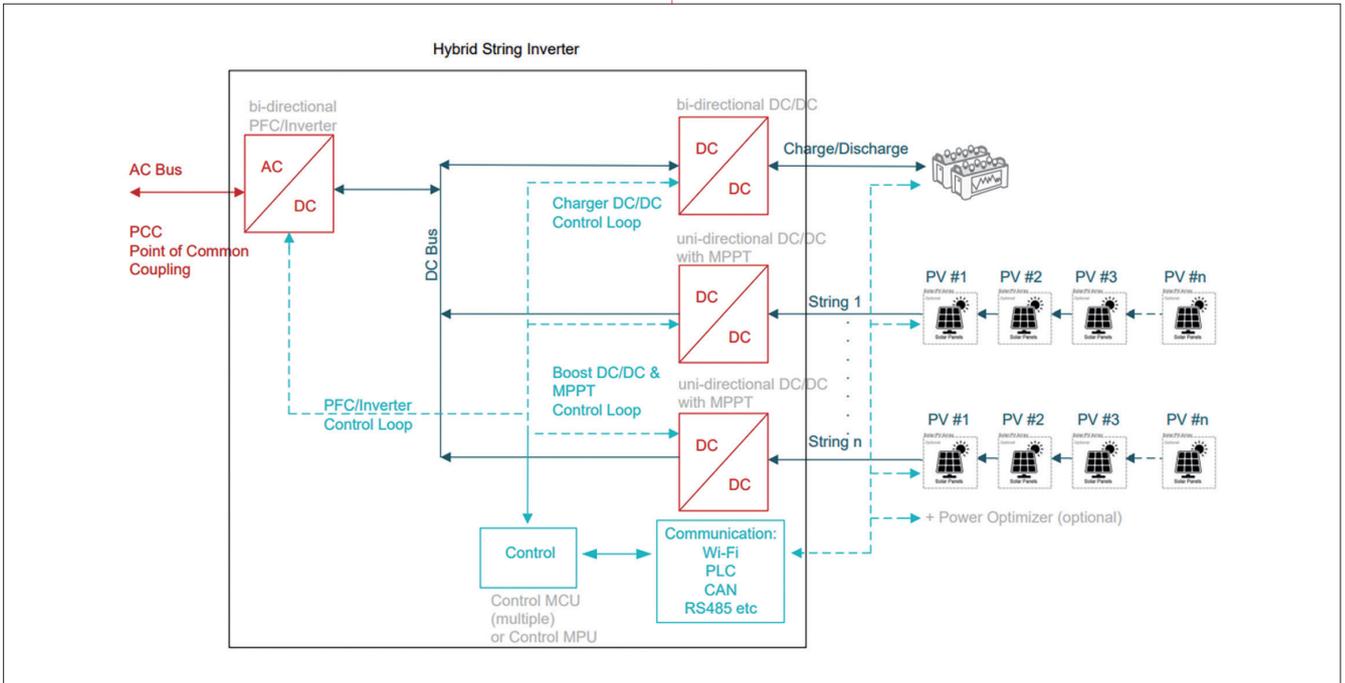
- 전류와 전압을 측정하고, 전원 스위치를 제어하며, 절연 모니터링을 수행하고, 스트링 아칭을 감지하며, 통신을 지원하는 MCU(마이크로컨트롤러).
- 방사 조도 및 온도와 같은 외부 변수에 관계없이 광발전 패널에서 사용 가능한 전력을 극대화하기 위한 전력 옵티마이저 등이 있다.

## IGBT와 GaN FET 비교

스트링 인버터는 일반적으로 IGBT(절연 게이트 양극 트랜지스터) 기반 전력 스위치를 사용한다. 그러나 IGBT는 테일 전류와 다이오드 역복구 문제로 인해 스위칭 손실이 크며, 온도의 영향을 받아 손실이 더욱 커진다. 이 때문에 낮은 주파수에서 동작해야 하고, 그 결과 부피가 큰 수동 소자와 방열판이 필요하다. 보통 스위칭 주파수는 5kHz에서 15kHz 범위에 머무른다.

반면, GaN(질화 갈륨) 전력 스위치는 소수 반송과 현상이 없어 스위칭 손실을 크게 줄일 수 있다. 손실이 줄어들

그림 1. 그리드에 연결된 하이브리드 스트링 인버터의 회로도



면 더 높은 주파수에서 구동할 수 있어 수동 소자의 크기를 줄일 수 있고, 평균적으로 기존 대비 6배 높은 주파수에서 동작할 수 있다. 본 문서에서는 GaN FET 기반의 10kW 스트링 인버터를 제안하며, 주거용 태양광 시스템에서 GaN 이 제공하는 장점과 효율성을 살펴본다.

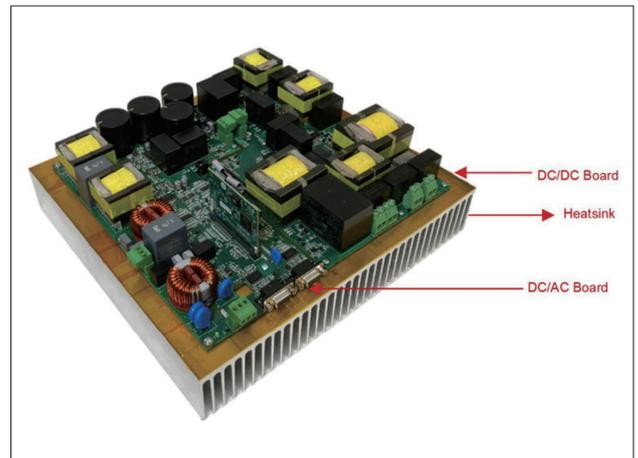
### GaN 기반 스트링 인버터의 설계 고려 사항

그림 2은 모든 액티브 및 패시브 부품을 포함하여 배터리 에너지 저장 시스템을 갖춘 10kW, GaN 기반 단상 스트링 인버터 레퍼런스 설계를 보여준다.

이 레퍼런스 설계는 다양한 스위칭 주파수에서 작동하는 4가지 전력 변환 시스템으로 구성된다.

- 2개의 독립적인 스트링 입력을 위한 2개의 부스트 컨버터, 각각 5kW 정격(134kHz)
- 10kW 정격 인터리브 양방향 DC/DC 컨버터(67kHz)
- 그리드를 위한 4.6kW 정격 양방향 DC/AC 컨버터 (89kHz)

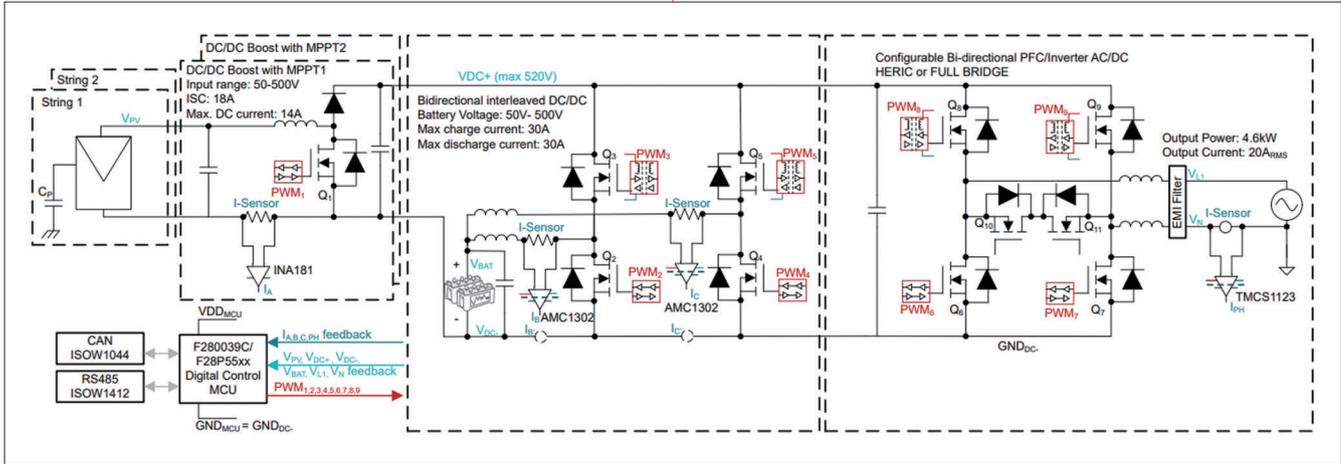
그림 2. GaN 장치 기반의 10kW 단상 레퍼런스 설계



### 전원 장치

상단에 위치한 650V 정격, 30mΩ LMG3522R030 GaN FET는 바닥면 냉각 장치와 비교했을 때 더 낮은 열 임피던스를 제공하며 효율적인 냉각이 가능하다. 이 FET에는 솔루션 비용을 절감하고 설계를 더욱 소형화할 수 있도록 통

그림 3. 단상 스트링 인버터 레퍼런스 설계 블록 다이어그램



합 게이트 드라이버가 포함되어 있다.

### MCU

그림 3에서 확인할 수 있듯이, 단일 MCU가 전체 레퍼런스 설계를 제어한다. TMS320F28P550SJ MCU는 4개의 전력 변환 스테이지, 보호 기능 및 다양한 제어 루프의 구현을 실시간으로 제어할 수 있다. 또한 MCU를 전원 접지 (GND DC-)에 참조할 수 있으며, 통합 게이트 드라이버 덕분에 GaN FET를 직접 제어할 수 있다. 이로 인해 하단 측면에는 절연 게이트 드라이버(Q1A, Q1B, Q2, Q4, Q6, Q7)가 필요하지 않다.

### 전류 감지

이 시스템은 여러 컨버터 스테이지에서 다양한 지점의 전류를 측정해야 한다. 부스트 컨버터의 경우, MCU가 전원 접지에 참조되기 때문에 INA181과 같은 셉트 기반 솔루션을 사용해 음극 레일에서 전류를 측정한다. 인터리브 컨버터에서는 고정밀 전류 센싱을 위해 강화 절연 증폭기인 AMC1302를 사용하며, 이를 통해 시간과 온도 변화에 따른 높은 정확도로 배터리 전류를 측정할 수 있다. 또한 내부 GaN 저손실 레귤레이터에서 생성되는 5V 전압은 전류 감지 증폭기에 전원을 공급한다. 인버터 스테이지에서

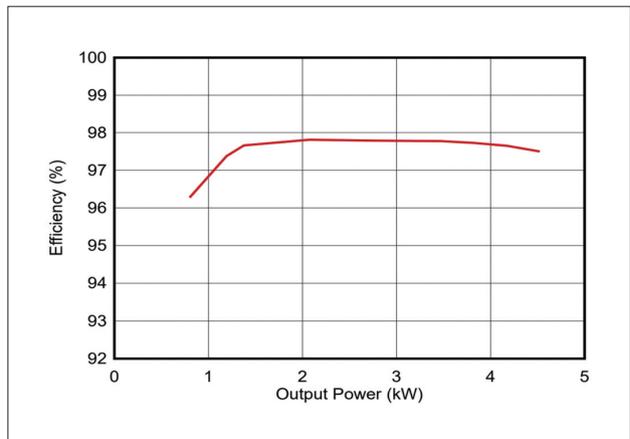
는 TMCS1123과 같은 홀 효과 전류 센서를 활용해 그리드 전류를 측정하며, 높은 대역폭과 정확도를 통해 전류 THD를 크게 줄일 수 있다.

### 실험 결과

TI는 이러한 시스템 전압으로 레퍼런스 설계를 작동했다.

- 스트링 입력 전압: 350V
- 공칭 배터리 전압: 160V
- 그리드 전압: 230V
- DC 링크 전압: 400V에서 제어됨

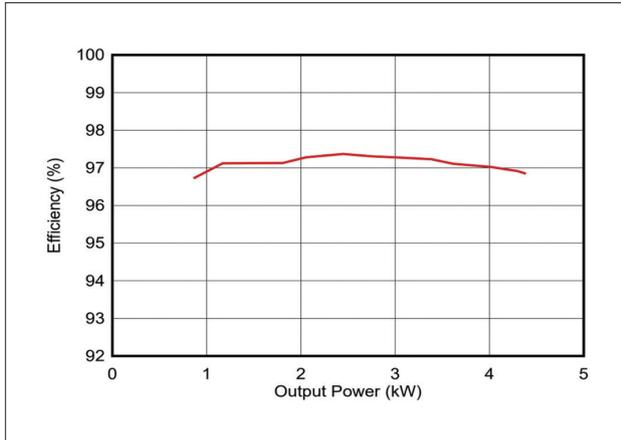
그림 4. 광발전 패널 출력에서 그리드로 전력을 변환할 때의 효율성 (350VDC, 230VAC)





GaN은 높은 전력 밀도를 가능하게 해 인버터의 크기와 무게를 줄일 수 있으며, 전체 효율성을 약 98%까지 끌어올릴 수 있다. 또한 통합 게이트 드라이버를 적용하면 시스템 전체 비용까지 절감할 수 있다.

그림 5. 배터리 출력에서 그리드로 전력을 변환할 때의 효율성(160VDC, 230VAC)

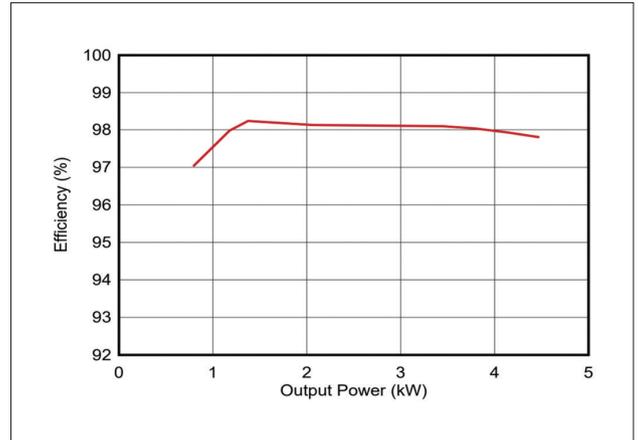


컨버터가 다양한 시나리오에서 작동할 때 이러한 효율성을 수집했다.

- 스트링 입력에서 전력이 드레인되어 그리드로 전달된다(그림 4 참조).
- 배터리에서 전력이 드레인되어 그리드로 전달된다(그림 5 참조).
- 스트링 입력에서 전력이 방전되어 배터리로 전달된다(그림 6 참조).

실험 결과, 시스템은 스트링 입력 전력에서 그리드로, 배터리에서 그리드로, 혹은 스트링 입력에서 배터리로 전력을 변환할 때 모두 우수한 효율성을 보였다. IGBT 기반 시스템보다 6배 높은 주파수에서 동작했음에도 효율은 거의 동일했으며, 전원 관리까지 포함했을 때 전체 효율은 약 98%에 달했다.

그림 6. 광발전 패널에서 배터리로 전력을 변환할 때의 효율성(350VDC, 160VDC)



## 결론

결론적으로, GaN은 높은 전력 밀도를 가능하게 해 인버터의 크기와 무게를 줄일 수 있으며, 전체 효율성을 약 98%까지 끌어올릴 수 있다. 또한 통합 게이트 드라이버를 적용하면 시스템 전체 비용까지 절감할 수 있다. 10kW급 GaN 스트링 인버터 레퍼런스 설계는 2.3kW/L의 전력 밀도와 뛰어난 성능을 통해 주거용 태양광 애플리케이션에 새로운 가능성을 제시한다. **SN**