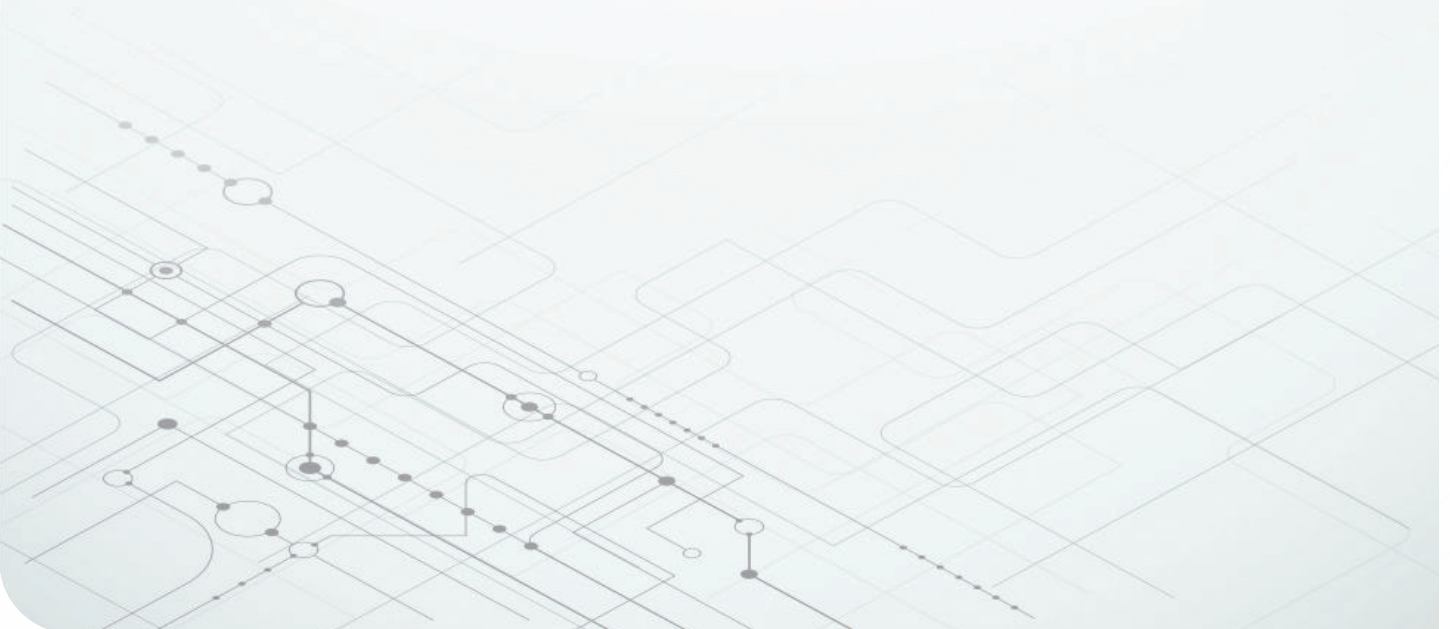


# 고전압 시스템의 전력 변환 간소화



**Sheng-yang Yu**  
System Manager  
Power Design Services



# 고전압 애플리케이션에서 효율적인 전력 변환을 제공하는 데는 여러 가지 과제가 있습니다. 그러나 부품, 토폴로지 및 시스템 수준의 혁신을 통해 고전압 전력 변환 시스템의 효율성과 밀도를 크게 높이는 동시에 설계를 간소화할 수 있습니다.

## 한눈에 보기

이 백서에서는 효율적인 고전압 전력 변환의 과제를 살펴보고 오토모티브 및 산업용 애플리케이션의 전원 공급 장치 설계를 간소화하는 데 도움이 되는 부품, 토폴로지 및 시스템 수준 혁신의 예를 제공합니다.



1

### 부품 혁신으로 광대역 갭 FET 성능 최적화

광대역 갭 전계 효과 트랜지스터(FET)는 MOSFET(금속 산화막 반도체 전계 효과 트랜지스터)에 대한 고효율 대안을 제공하지만, 최적의 성능을 위해 절연 게이트 드라이버 및 디지털 컨트롤러와 같은 특수 컴패니언 장치가 필요합니다.



2

### 토폴로지 혁신을 통한 전력 밀도 극대화

올바른 토폴로지를 선택하면 고전압 전력 설계의 전력 밀도와 효율에 큰 영향을 줄 수 있습니다.



3

### 시스템 수준의 혁신으로 최고의 효율성 목표 달성

시스템 아키텍처 혁신과 제어 시스템 혁신은 설계자가 더 높은 효율성과 전력 밀도를 달성할 수 있도록 합니다.

전력 설계자들이 바쁘게 일하고 있습니다. 전력 설계자는 끊임없는 전력 수준 상승을 따라가야 할 뿐만 아니라 전력 공급의 효율성과 전력 밀도를 지속적으로 개선할 수 있는 창의적인 방법을 찾아야 합니다. 고전압에서는 이런 과제가 훨씬 더 두드러지게 나타납니다.

고전압 시스템에서 효율적인 전력 변환을 제공하려면 고전압 부품, 전기 및 자기 회로 모델링 기술에 대한 심도 있는 지식, 기능 또는 안전 절연을 위한 절연 요구 사항에 대

한 이해, 전자기 호환성, 전력 컨버터 제어 기술 등에 대한 전문 지식이 필요합니다.

고전압 전원 설계를 간소화하는 것은 어려운 작업이지만 불가능하지는 않습니다.

## 고전압이 필요한 이유

전세계적인 전기화 추세가 지속적으로 추진력을 얻으면서 더 높은 전력 수준에서 효율적인 에너지 전달이 오늘날의 전력 전자 시스템에서 중요한 고려 사항이 되었습니다. 저항 손실( $I^2R$ )은 전원 공급 장치가 제공할 수 있는 전력의 양을 제한하는 핵심 요소입니다. 시스템 효율을 개선하기 위해, 전력을 전송 및 공급하는 데 사용되는 전압을 높이면 동일한 전력 수준에 필요한 전류가 줄어들고 열을 통한 손실을 최소화하는 데 도움이 됩니다.

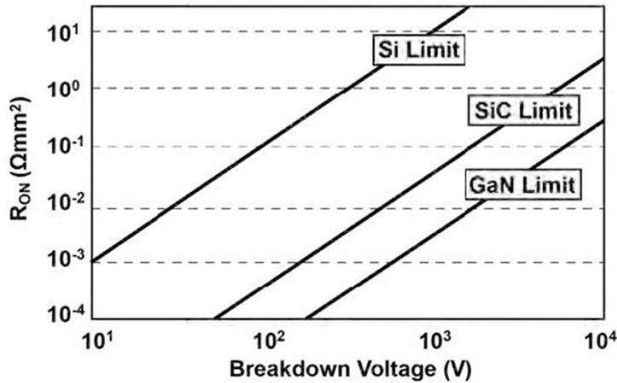
오늘날의 전력 네트워크에 널리 적용되는 고전압 시스템의 몇 가지 예로는 가정용 AC 분배 전원 시스템, 통신 및 서버 전력 시스템, 재생 가능 에너지 시스템의 DC 마이크로그리드, 에너지 저장 시스템, EV(전기 자동차) 온보드 및 오프보드 충전기 등이 있습니다. 예를 들어, EV 배터리는 현재 400V이지만 보다 우수한 가속 성능을 위해 트랙션 인버터로 더 즉각적인 전력 전송을 지원하기 위해 800V로 점점 더 높아지고 있습니다.

더 높은 전압에서 작동하는 것은 전력 변환에 시스템 효율 이점을 제공하지만, 안전한 휴먼 인터페이스를 위해서는 적절한 갈바닉 절연 및 절연이 필수적입니다. 또한, 폐쇄 루프 시스템은 일반적으로 절연 경계를 통한 신호 통신이 필요합니다. 여기에 토폴로지 선택, 자기 회로 설계, 전자기 간섭 고려 사항, 작동 모드, 열 관리, 레이아웃 및 제어 최적화를 추가하면 고전압 시스템 작업 시 중요한 설계 과제 몇 가지를 이해하기 시작할 수 있습니다. 전체적으로 부품 혁신, 토폴로지 혁신, 시스템 수준 혁신 등 세 가지 핵심

영역의 혁신을 통해 고전압 전력 변환 시스템의 효율성과 밀도를 높이면서 동시에 설계를 간소화할 수 있습니다.

### 부품 혁신으로 광대역 갭 FET 성능 최적화

SiC(실리콘 카바이드) MOSFET 또는 GaN(질화 갈륨) FET와 같은 광대역 갭 FET는 실리콘 MOSFET의 고효율 대안을 제공합니다. 광대역 갭 FET는 **그림 1**에서 볼 수 있는 실리콘 MOSFET과 동일한 전압 수준에서도 매우 낮거나 심지어 역복구 충전( $Q_{rr}$ )이 없으며, 온 저항이 더 낮습니다.



**그림 1.** 이론적인 온 저항과 차단 전압.

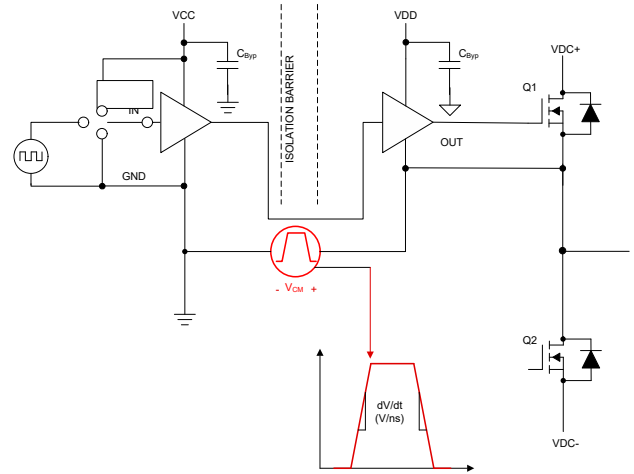
또한 게이트 전하( $Q_g$ )와 출력 커패시턴스( $C_{oss}$ )를 비롯한 거의 다른 모든 기생은 실리콘 MOSFET에 비해 광대역 갭 FET에서 훨씬 낮기 때문에 스위칭 속도가 훨씬 빠릅니다. 슈퍼정선 실리콘 MOSFET의 회전율이 80V/ns 미만인 것에 비해 회전율이 150V/ns 이상입니다. 스위칭 속도가 빨라지면 전원 스위치가 켜지거나 꺼지는 데 걸리는 시간이 짧아지고 스위칭 손실이 줄어듭니다.

### 올바른 게이트 드라이버 선택

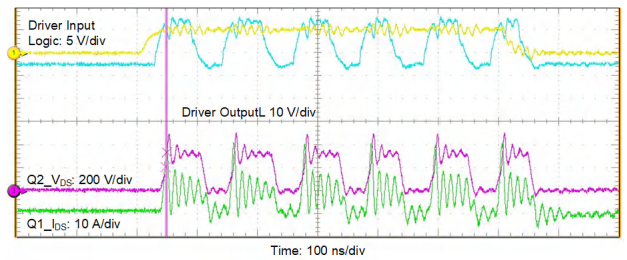
전기적인 특성과 성능 때문에 광대역 갭 기술로 전환해야 하므로, 신중한 접근 방식과 컴패니언 부품 선택이 필요합니다. 스위칭 손실을 더 최소화하기 위해 광대역 갭 FET는 게이트 커패시턴스를 빠르게 충전하고 방전할 수 있는 적절한 게이트 드라이버가 필요합니다. 기존의 실리콘 MOSFET 게이트 드라이버는 적절한 전압 조절을 제공하지 못하거나 광대역 갭 설계에서 높은 공통 모드 전압 과도를 처리할 수 없기 때문입니다.

**그림 2**에서 보듯이, 스위칭 이벤트가 발생할 때 스위칭 노드의 전압 변화는 드라이버의 기생 커패시턴스를 통해 전

류 흐름을 생성합니다. 드라이버에 충분한 공통 모드 과도 내성(CMTI)이 없으면 **그림 3**에 나와 있는 것처럼 공통 모드 전류로 게이트 드라이버 오작동을 유발할 수 있습니다.



**그림 2.** 스위칭 이벤트에 의한 공통 모드 전류.

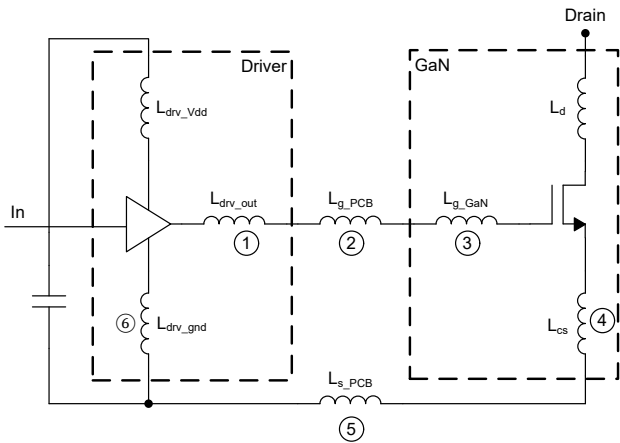


**그림 3.** 게이트 드라이버 CMTI 고장 예.

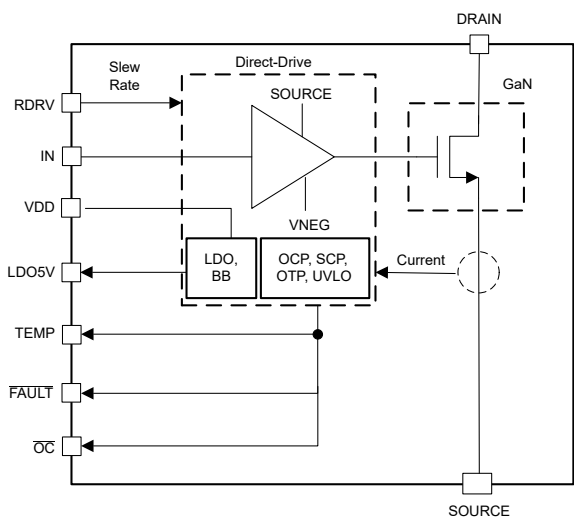
게이트 드라이버 문제와 CMTI 문제를 해결하기 위해 엔지니어는 밀러 클램프, 높은 CMTI 정격, 조정 가능한 회전율 기능을 갖춘 새로운 게이트 드라이버를 사용하여 관통 또는 게이트 드라이버 오작동을 방지할 수 있습니다. TI의 **UCC5880-Q1** 강화 절연 게이트 드라이버의 경우 안전 및 성능 목표를 달성하면서 전력 밀도를 높이고 시스템 설계 복잡성과 비용을 줄일 수 있는 기능인 실시간 가변 게이트 드라이브 강도를 최대 20A까지 갖추고 있습니다. TI의 **300kW DC/AC 고전력, 고성능 차량용 SiC 트래션 인버터 레퍼런스 설계**는 다양한 부하 조건에서 주행 속도를 조정함으로써 여기서 논의된 효율과 과제를 해결하는 방법을 보여줍니다.

스위칭이 빠르다는 것은 스위칭 손실이 낮다는 것을 의미하지만 원치 않는 전압 링잉 및 공통 모드 잡음 문제가 발생할 수도 있습니다. **그림 4**에서는 개별 게이트 드라이버가 있는 GaN FET를 보여줍니다. 두 장치 자체의 기생 인덕

턴스뿐 아니라 연결 구리의 PCB(인쇄 회로 보드) 트레이스 인덕턴스도 있습니다. 구동 루프의 총 인덕턴스는 GaN FET  $V_{DS}$  전환을 늦추기 때문에 GaN FET가 줄일 수 있는 스위칭 손실을 제한합니다. **LMG3526R030(그림 5 참조)**과 같은 TI GaN FET가 동일한 패키지에 게이트 드라이버를 통합하는 이유가 여기에 있습니다. 게이트 드라이버를 통합한 경우 PCB 인덕턴스( $L_{g\_pcb}$  및  $L_{s\_pcb}$ )이 없습니다. 또한 켈빈 소스 연결은 게이트 드라이브 루프( $L_{CS}$  최소화)를 위해 제작됩니다. 따라서 TI GaN FET는 높은 과도 전압에서 스위칭할 수 있으며, 그에 따라 스위칭 손실이 최소화됩니다.



**그림 4.** 개별 게이트 드라이버와 루프의 기생 인덕턴스를 갖춘 GaN FET입니다.

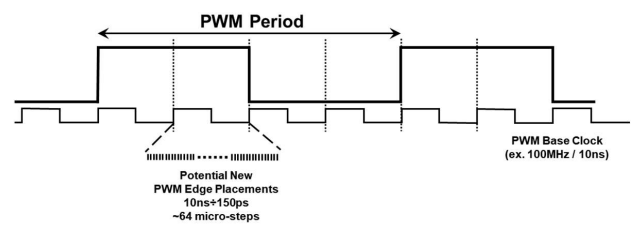


**그림 5.** 간소화된 LMG3526R030 블록 다이어그램.

## 올바른 컨트롤러 선택

오늘날의 고전압 시스템에서 자기 부품은 전체 전력 변환 단계의 큰 부분을 차지합니다. 자기 부품의 크기를 줄이면 작동 주파수를 증가시켜야 합니다. 따라서 고전압 시스템의 다양한 고성능 요구 사항을 관리하기 위해서는 전용 디지털 제어가 필요합니다. 이러한 컨트롤러는 실시간으로 작동하여 시스템 매개 변수(예: 전압, 전류, 온도)를 정확하게 측정하고, 출력 명령을 계산하기 위해 제어 알고리즘을 적용하고, 전력 밀도를 개선하는 데 필요한 고주파를 지원해야 합니다. 실시간 제어의 핵심은 감지, 처리 및 제어 기능 사이의 시간을 최소화하는 것입니다. 더 나은 실시간 신호 체인 성능을 통해 더 빠른 과도 응답, 더 안정적이고 정확한 전력 변환과 더 높은 전력 밀도를 구현합니다.

실시간 제어의 한 가지 과제는 사이클링을 제한하는 것으로, 이는 PWM(펄스 폭 변조) 출력이 수학적 솔루션에서 컨트롤 법칙에 물리적으로 수렴하지 못한다는 것을 의미합니다. 이로 인해 PWM 출력이 실제 솔루션 주변에서 진동하여 제어 시스템이 불안정해집니다. **TI의 C2000™ 실시간 MCU**와 같은 마이크로컨트롤러(MCU)의 고해상도 PWM(HRPWM) 모듈은 PWM 에지를 150ps 증분으로 변조하는 기능을 제공합니다. 이는 시스템 클럭 속도(그림 6 참조)를 기반으로 기존 PWM 생성 기법에 비해 6배 향상된 것으로, PWM 에지 배치에서 더 높은 정밀도를 실현할 수 있습니다. 파형의 기간, 보상에 대한 위상 관계, 데드밴드 삽입 시간 등은 모두 이 고해상도 기술을 구현하는 데 도움이 됩니다.



**그림 6.** HRPWM 기능과 기존의 PWM 생성 방법 비교.

또 다른 실시간 제어 과제는 3레벨 인버터 토폴로지에서 고유한 고장 방지 기능이 필요하다는 것입니다. 2레벨 인버터에서 모든 FET를 동시에 즉시 끄는 대신 3레벨 인버터의 경우 FET 손상을 방지하기 위해 올바른 스위치 끄기 순서를 유지해야 합니다. 과거에 일부 설계자들은 FPGA(Field Programmable Gate Array) 또는 CPLD(Complex Programmable Logic Device) 같은 외부

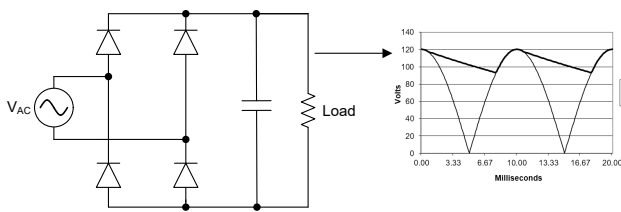
하드웨어 회로를 사용하여 이러한 보호 수준을 달성했지만 이러한 회로는 시스템 비용 및 개발 노력을 증가시킵니다.

이 문제를 해결하기 위해 C2000 구성 가능한 로직 블록은 소프트웨어를 통해 칩 내에서 사용자 지정 로직을 만드는 메커니즘을 제공하고, 외부 FPGA 또는 CPLD에서 달성한 기능을 대체하고 시스템 비용과 개발 노력을 줄이는 더 단순한 옵션을 제공합니다.

광대역 갭 장치는 효율성과 전력 밀도를 크게 높이는 데 도움이 될 수 있습니다. 절연 게이트 드라이버 및 디지털 컨트롤러와 같은 다른 부품 혁신이 없다면 설계의 효율성 개선을 완전히 실현할 수 없습니다.

### 토폴로지 혁신을 통한 전력 밀도 극대화

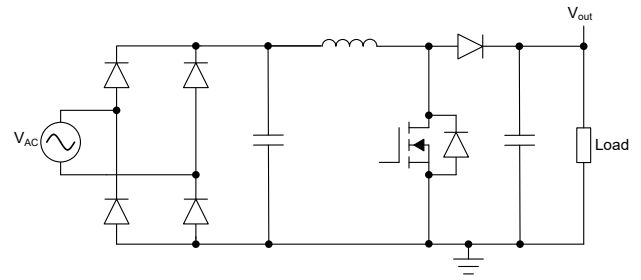
부품 수준의 혁신 외에도 토폴로지 혁신을 통해 고전압 시스템의 전력 변환을 간소화할 수 있습니다. AC/DC 정류기는 광대역 갭 기술이 잘 알려진 토폴로지를 높여 전력 밀도를 개선하고 설계 무게를 줄이는 방법을 보여주는 좋은 예입니다. 역사적으로, 엔지니어들은 **그림 7**에 나와 있는 것처럼 DC 전압으로 AC 전압을 수정하기 위해 커패시터가 있는 브리지 다이오드 정류기를 사용했습니다.



**그림 7.** 풀 브리지 정류기.

이러한 정류기의 전력 역률은 출력 커패시터와 부하의 총 임피던스에 따라 일반적으로 0.5 미만입니다. 이러한 설계는 사용되지 않는 전력(무효 전력)이 너무 많이 생성되므로 에너지 효율이 떨어집니다.

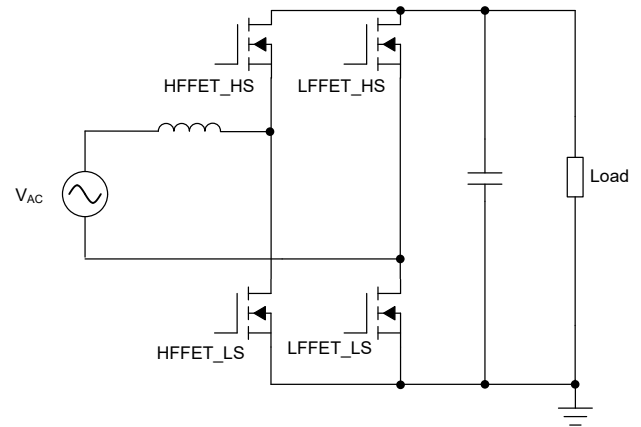
저역률 문제를 해결하기 위해 엔지니어들은 능동형 전력 역률 보정(PFC) 회로에 대한 아이디어를 구상했습니다. **그림 8**에서는 일반적으로 범용 AC 전압(90V AC~264V<sub>AC</sub>)을 사용하고 출력에서 전압을 조정된 400V 전압으로 부스트하는 부스트 PFC 회로를 보여줍니다. 입력 전압 감지를 통해 컨트롤러는 인덕터 전류를 조정하여 AC 시누소이드 모양을 따라 거의 1에 가까운 역률(0.99)을 얻습니다.



**그림 8.** 부스트 PFC 회로.

이러한 유형의 부스트 PFC 정류기는 슈퍼 접합부 실리콘 MOSFET 및 SiC 다이오드를 통해 뛰어난 고효율(>98%)을 달성할 수 있습니다.

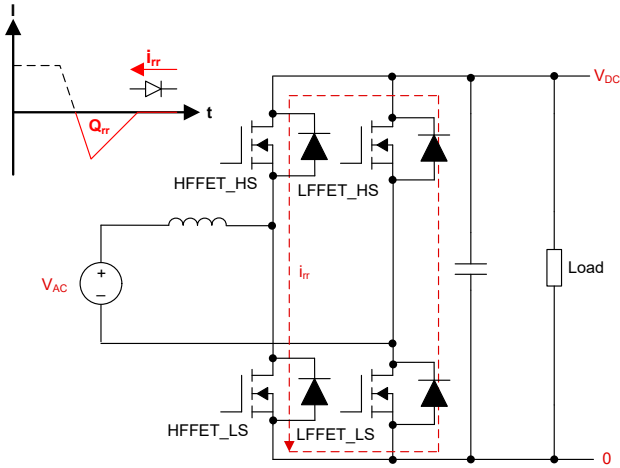
부스트 PFC 정류기의 풀 브리지 다이오드 정류기는 킬로와트 레벨 고전압 시스템에서 전체 효율성 손실의 1% 이상을 소비합니다. 예를 들어 풀 브리지 다이오드 정류기에서 20W 이상의 손실은 2kW 정류기에서 예상됩니다. 단일 장치에서 20W 손실을 줄이는 것은 매우 어렵습니다. 풀 브리지 다이오드 정류기의 손실을 줄이기 위해 **그림 9**에 나와 있는 토렘 풀 브리지리스 PFC가 좋은 대안을 제시합니다. 정류기 기능은 부스트 컨버터에 통합되며 추가 MOSFET 2개만 있기 때문에(4개의 다이오드 대신) 총 정류기 손실(2개의 저주파 FET)은 원래 브리지 정류기 예에 비해 훨씬 낮습니다.



**그림 9.** 토렘풀 브리지리스 PFC 회로.

CCM(연속 전도 모드) 토렘 풀 브리지리스 PFC는 고전압 정류기에 널리 적용되는 하드 스위칭 컨버터입니다. 따라서 토렘 풀 브리지리스 PFC에 실리콘 MOSFET를 적용하면 실리콘 MOSFET이  $Q_{rr}$ 로 인한 높은 스위칭 손실을 겪게 됩니다. **그림 10**에서 보듯이, 왼쪽 상단 MOSFET 바디 다이오드 전류 전도 후,  $Q_{rr}$ 은 역방향 복구 전류를 생성하여

왼쪽 하프 브리지의 데드 타임 중에 왼쪽 하단에 있는 MOSFET  $C_{oss}$ 를 충전합니다. 왼쪽 하단 MOSFET이 켜지면  $Q_{rr}$ 유도 에너지는 왼쪽 하단 MOSFET로 소산됩니다.  $Q_{rr}$ 관련 손실은 풀 브리지 다이오드 정류기의 손실 감소를 소비합니다.



**그림 10.** 토템 폴 브리지리스 PFC의 역복구 충전으로 인한 스위칭 손실.

광대역 갭 FET가 있으면 대부분의 경우 새로운 토템 폴 브리지리스 PFC 토폴로지를 통해  $Q_{rr}$  관련 손실 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있습니다. SiC MOSFET은 동일한 온저항 수준으로 슈퍼정션 MOSFET보다 20배 더 작은  $Q_{rr}$ 을 달성할 수 있으며, GaN FET는 제로  $Q_{rr}$ 을 달성할 수 있습니다. 정류기 예에서 부품 및 토폴로지 혁신을 조합할 때 (즉, 토템 폴 브리지리스 PFC와 광대역 갭 FET 적용) 99% 이상의 효율성(1% 이상의 효율성 개선)을 달성하고, 설계에서 더 높은 전력 밀도와 더 가벼운 무게를 실현할 수 있습니다.

## 시스템 수준의 혁신으로 최고의 효율성 목표 달성

오늘날의 부품 및 토폴로지 혁신을 통해 이전보다 훨씬 높은 효율성을 갖춘 전력 변환 시스템을 구현할 수 있습니다.

새롭게 부상하는 DC 그리드 시스템은 기존의 중앙 집중식 AC 그리드 시스템보다 훨씬 더 단순하고 효율적이며 안정적인 고전압 솔루션을 제공합니다. 예를 들어, 광발전(PV) 전력 시스템은 PV 패널에서 120V 또는 240V AC 그리드로 전력 변환 단계를 하나만 필요로 합니다. 분산 DC 그리드 시스템은 고전압 전력 변환을 크게 간소화하고 시스템 가용성과 안정성을 높일 수 있습니다.

시스템 아키텍처 혁신 외에도, 제어 시스템 혁신은 고전압 전력 변환 시스템을 간소화하고 개선하는 또 다른 방법입니다. 계속해서 PFC를 예로 들어 보겠습니다. AC와 관련된 고전력 애플리케이션에서는 CCM PFC가 더 낮은 인덕터 리플 전류를 허용하므로 가장 먼저 선택되어야 합니다. 따라서 더 작은 차동 전자기 간섭(EMI) 필터가 필요합니다. CCM PFC와 비교했을 때, 임계 전도 모드(CRM) PFC는 PFC 인덕터 전류가 항상 0에서 시작하거나 더 작은 인덕턴스로 음수로 시작하므로 턴온 순간 전원 스위치의 전류가 거의 0에 가깝기 때문에 스위칭 손실이 훨씬 적고 효율이 높습니다. 하지만 동일한 전력을 공급할 때는 인덕터 전류 리플이 CCM PFC보다 훨씬 높기 때문에 EMI 필터 설계가 어려워질 수 있습니다.

효율성과 차동 EMI 잡음 수준 사이의 적절한 균형을 제공하는 세 번째 옵션은 다중 모드 작동으로, 모든 AC 사이클에서 CCM과 CRM 작업을 조합하여 제공합니다. 다중 모드 작동 시 PFC가 AC 사이클에서 CCM과 CRM을 모두 작동할 수 있도록 PFC 인덕터 인덕턴스는 CCM 작동에 사용되는 PFC 인덕터에 비해 작지만 CRM 작동에 사용되는 PFC 인덕터보다 커야 합니다. **그림 11**에서는 이 세 가지 모드에서 리플 전류 엔벨로프를 보여줍니다.

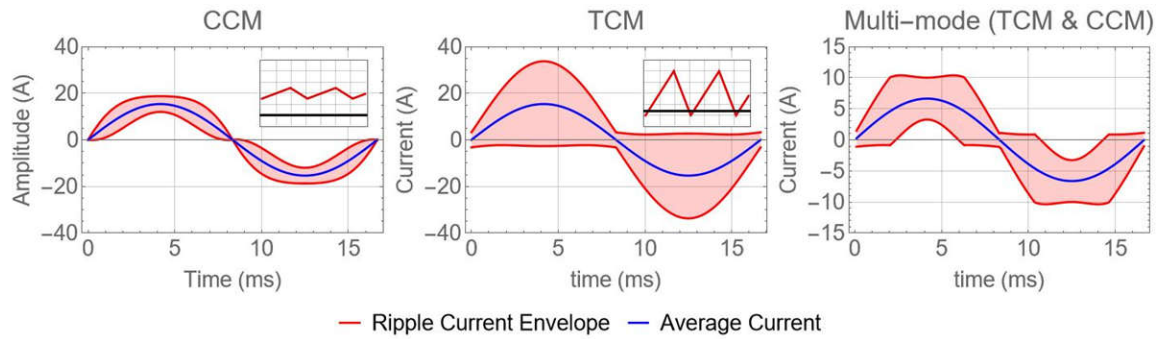


그림 11. CCM, CRM 및 다중 모드 작동 시 PFC 인덕터 전류(왼쪽에서 오른쪽).

그림 12에서는 동일한 사양의 다중 모드 PFC와 CRM PFC(제로 전압 스위칭이 보장된다고 가정) 사이의 손실 비교를 보여줍니다. 다중 모드 PFC 설계에는 60kHz~250kHz 범위의 작동 주파수를 지원하는 150μH PFC 인덕터가 있고, CRM PFC 설계에는 75kHz~750kHz 범위의 작동 주파수를 가진 25μH PFC 인덕터가 있습니다. 결과적으로 CRM PFC는 더 높은 작동 주파수와 더 작은 인덕터를 사용하여 절반 부하에서 FET 손실을 40% 이상 줄입니다. 이는 고효율 고전압 전력 변환 시스템이 소프트 스위칭 토폴로지를 채택하는 방향으로 이동해야 함을 나타냅니다.

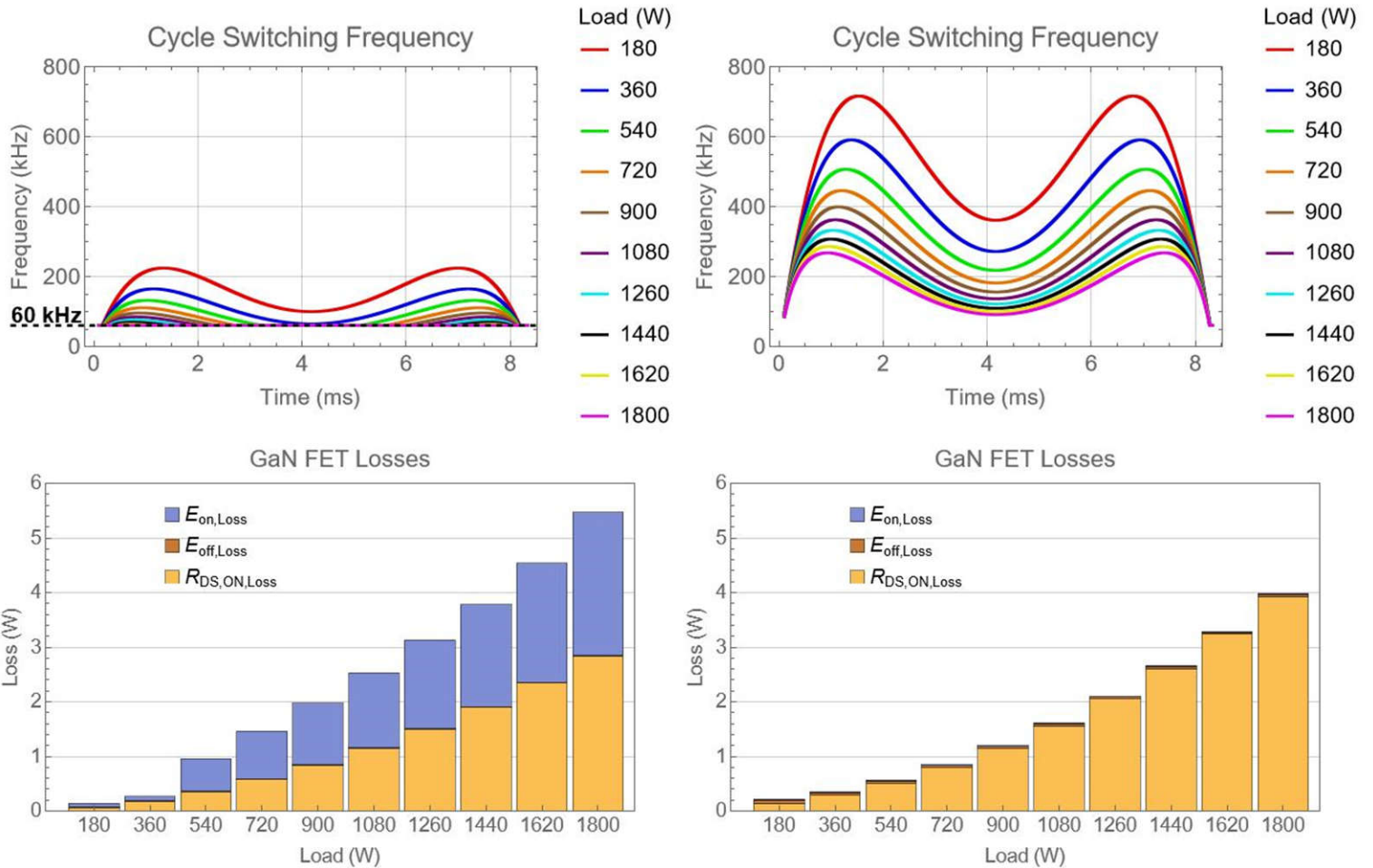
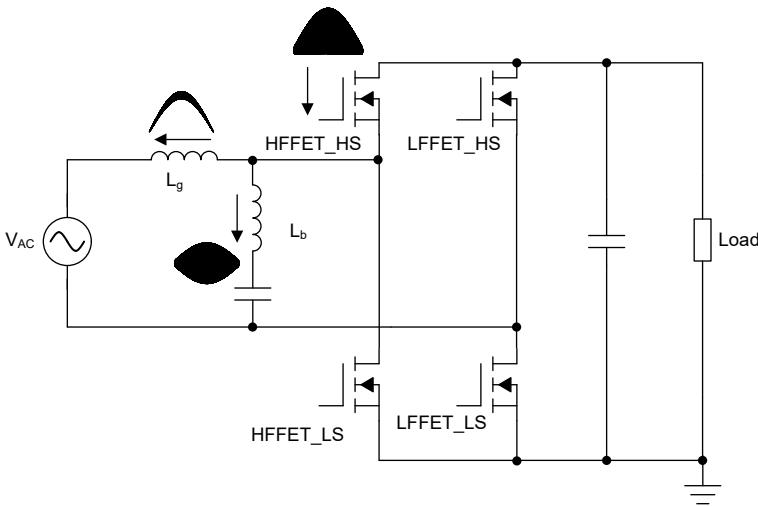


그림 12. 1.8kW 전원 공급 장치의 다중 모드 PFC(왼쪽)와 CRM PFC에서 주파수 스펙트럼 및 FET 손실.

## EMI 과제 해결

엔지니어는 PFC 인덕터를 두 가지 요소로 나누어 EMI 필터 설계 과제를 해결할 수 있습니다. 하나는 높은 인덕턴스 인덕터( $L_g$ )가 AC 소스에 연결되고 낮은 인덕턴스 인덕터( $L_b$ )가 커패시터와 직렬로 연결되고 **그림 13**에 표시된 것처럼 전력계에 병렬로 배치되어 있습니다. 인덕터 분할의 아이디어는 큰 AC 리플 전류가 직렬 인덕터와 커패시터(낮은 총 임피던스)를 통과하도록 하고  $L_b$ (높은 임피던스) 및 AC 소스에서 전류 리플을 최소화할 수 있도록 하는 것입니다. 따라서 차동 모드 잡음이 낮기 때문에 EMI 필터 설계가 더욱 쉬워집니다.



**그림 13.** 수정된 토렘 폴 브리지리스 PFC 회로.

수정된 소프트 스위칭 CRM PFC를 사용하면 EMI 필터 설계 문제를 해결할 수 있지만, CRM PFC 자체에는 소프트 스위칭을 보장하기 위해 PFC 활성 스위치 시동 타이밍을 결정하기 위한 추가 센서 및 제어 작업이 필요합니다. 한 가지 옵션은 전류 변압기와 같은 전류 감지 장치를 추가하여 제로 전류 지점을 감지하는 것입니다. 이를 통해 FET  $C_{oss}$ 를 기반으로 활성 FET 턴온 타이밍을 계산할 수 있습니다. 감지 및 제어 시스템과 부품 허용 오차의 전파 지연으로 인해 활성 FET 턴온 타이밍 오류가 발생합니다. 이 제어 체계에는 사이클별 감지 및 제어가 필요하기 때문에 MCU 리소스 사용량이 더 많을 것으로 예상해야 합니다.

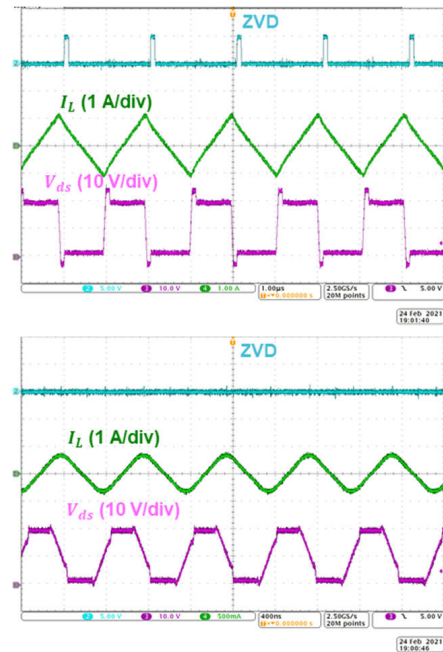
대체 방법은 PFC 인덕턴스 및 FET  $C_{oss}$ 와 함께 입력 및 출력 전압 감지 결과를 기반으로 필요한 FET의 온/오프 시간을 계산하는 것입니다. 그런 다음 FET 드레인-소스 전압 감지를 사용하여 소프트 스위칭을 달성했는지 확인할 수 있

습니다. 게이트 신호가 높아지기 전에 드레인-소스 전압이 음으로 변하지 않으면 FET가 하드 스위칭 상태에 있음을 의미합니다.

**그림 13**에 나와 있는 FET를 예로 들어보겠습니다. 여기서 HFFET\_HS 온타임이 연장되면 더 많은 음극 전류가 HFFET\_LS  $C_{oss}$ 를 방전하여 소프트 스위칭을 달성할 수 있습니다. 게이트 신호가 높아지기 전에 드레인-소스 전압이 음으로 변하면 FET가 이미 소프트 스위칭 상태에 있음을 의미합니다. HFFET\_HS의 온타임을 줄이면 제곱평균제곱근 전류가 최소화되어 효율성이 향상됩니다. 따라서 FET 온 타임은 더 이상 모든 사이클마다 업데이트되지 않지만 소프트 스위칭이 발생하지 않을 때만 조정되어 MCU 리소스 사용에 많은 영향을 미칩니다.

필요한 소프트 스위칭 감지 회로를 FET에 통합하면 시스템을 더 간소화할 수 있습니다. **그림 5**에서 보듯이 **LMG3526R030** 장치는 GaN FET, 드라이버, 보호 및 FET 드레인 투 소스 전압 감지를 하나의 패키지로 통합합니다. GaN FET가 채널 전도 전에 3사분면 전도 상태에 있을 때 마다 LMG3526R030은 소프트 스위칭을 표시하기 위해 제로 전압 감지 펄스를 보냅니다.

**그림 14**에서는 3사분면 전도가 있는 경우와 없는 경우의 LMG3526R030 파형 예를 보여줍니다.



**그림 14.** 3사분면 전도가 있는 경우(위쪽) 및 없는 경우 LMG3526R030의 파형.



LMG3526R030의 제로 전압 감지 기능을 사용하여 **가변 주파수, ZVS, 5kW, GaN 기반, 2상 토렘 풀 PFC 레퍼런스 설계**는 부품, 토폴로지 및 제어 시스템 혁신을 결합하여 99.1% 이상의 피크 효율성을 입증했습니다.

## 결론

오늘날 고전압 전력 변환 시스템을 설계하는 것이 10년 전 보다 훨씬 더 쉬워졌지만, 새로운 기술로 인해 새로운 과제가 발생합니다. 엔지니어가 고전압 시스템의 효율성, 전력 밀도 및 성능을 극대화할 수 있도록 설계의 모든 부분이 함께 발전해야만 혁신적인 고전압 시스템을 구현할 수 있습니다.

GaN IC, 절연 게이트 드라이버, 절연 DC/DC 컨버터 및 모듈, C2000 실시간 마이크로컨트롤러를 비롯한 TI의 고전압 전력 변환 기술은 부품, 토폴로지 및 시스템 수준의 혁신을 활용하여 고효율, 고전력 밀도, 고전압 전력 변환 시스템 설계를 간소화합니다. TI의 고전압 기술에 대해 자세히 알아보려면 [TI.com/highvoltage](https://www.ti.com/highvoltage)를 참조하십시오.

## 추가 리소스

- **질화 갈륨(GaN) IC**
- **절연 게이트 드라이버**
- **절연 DC/DC 컨버터 및 모듈**
- **C2000 실시간 마이크로컨트롤러**

**중요 알림:** 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated