



Xun Gong

Systems Manager, HEV/EV Traction Inverter

**추상**

이 기술 백서에서는 트랙션 인버터를 위한 주요 시스템 트렌드, 아키텍처 및 기술을 살펴봅니다. 절연, 고전압 도메인 및 저전압 도메인 기술을 포함하여 트랙션 인버터를 구현하는 데 사용되는 장치 및 기술도 다룹니다. 마지막으로 이 문서는 트랙션 인버터 설계 시간을 단축할 수 있는 시스템 엔지니어링 개념 및 설계를 중점적으로 다룹니다.

**목차**

1 머리말.....	2
2 아키텍처와 트렌드.....	3
3 트랙션 인버터를 활성화하는 핵심 기술.....	4
4 마이크로컨트롤러.....	6
4.1 Sitara 제품군.....	6
4.2 실시간 제어 MCU.....	7
5 절연 게이트 드라이버.....	8
6 저전압 바이어스 공급 장치.....	10
7 고전압 바이어스, 중복 공급 장치.....	11
8 DC 링크 활성 방전.....	11
9 모터 위치 감지.....	12
10 절연 전압/전류 감지.....	13
11 시스템 엔지니어링 및 레퍼런스 설계.....	13
12 결론.....	14
13 참고 문헌.....	14

**그림**

그림 2-1. 3레벨 T형 인버터.....	3
그림 3-1. 트랙션 인버터 시스템 블록 다이어그램.....	5
그림 4-1. AM2634-Q1이 장착된 트랙션 인버터 시스템 블록 다이어그램.....	6
그림 4-2. 트랙션 인버터 제어를 위한 TMU 개선.....	7
그림 5-1. UCC5870-Q1 게이트 드라이브 강도.....	8
그림 5-2. 경쟁 장치 게이트 드라이브 강도.....	8
그림 5-3. UCC5870-Q1 조정 가능한 게이트 드라이브를 구현한 설계 다이어그램.....	9
그림 5-4. UCC5870-Q1 조정 가능한 게이트 드라이브를 구현한 설계 보드.....	9
그림 5-5. 5.5Ω 게이트 저항을 사용한 약한 드라이브.....	9
그림 5-6. 0.5Ω 게이트 저항을 사용한 강한 드라이브.....	9
그림 6-1. UCC14240-Q1 EVM 보드.....	10
그림 8-1. 스마트 AFE를 기반으로 하는 DC 링크 활성 방전.....	11
그림 8-2. 파형 테스트.....	11

**표**

표 5-1. 400V 버스 전압에서의 스위칭 에너지 비교.....	9
표 5-2. 800V 버스 전압에서의 스위칭 에너지 비교.....	10

## 상표

C2000™, Code Composer Studio™, and 론치패드™ are trademarks of Texas Instruments.  
 Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.  
 모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

## 1 머리말

트랙션 인버터는 EV(전기차) 드라이브트레인 시스템의 핵심입니다. 따라서 인버터는 전 세계 EV의 도입을 증가시키는 데 필수적인 역할을 합니다. 트랙션 모터는 배터리 또는 제너레이터에서 AC 전원으로 DC 전력을 변환하여 영구 자기 기계 (PMSM), 인덕션 모터(IM), 외부 자극 동기 모터(EESM) 및 스위치 자기 저항 모터(SRM)와 같은 트랙션 드라이브 모터에 전원을 공급함으로써 탁월한 토크와 가속을 제공합니다. 또한 트랙션 인버터는 모터의 회수 에너지를 변환하여 차량이 타력 주행하거나 제동하는 동안 배터리를 충전합니다.

트랙션 인버터의 성능 측정 시 고려해야 할 몇 가지 주요 설계 우선 순위와 장단점이 있습니다.

- 기능 안전 및 보안 - 기능 안전 설계는 일반적으로 안전 진단, 시스템 수준 고장 모드 및 효과 분석, 고장 모드, 영향 및 진단 분석, 하드웨어 보안 모듈(HSM)을 포함하는 ISO 26262 또는 e-안전 차량 침입 방지 애플리케이션 프로세스를 따릅니다.
- 무게 및 전력 밀도 - 와이드 밴드갭 스위치 및 파워트레인 통합은 고전력 밀도 인버터 설계를 가능하게 하는 핵심 기술입니다. 예를 들어 2025년까지 미국 시장에서 100kW/L과 같은 OEM의 인버터 전력 밀도 목표를 달성하게 됩니다. SiC를 사용하면 800V DC 버스 전압이 가능하며, 전류 정격 및 와이어링 하니스가 감소합니다. 빠른 제어 루프를 갖춘 MCU를 사용하면 DC-DC 컨버터에 통합된 인버터와 같은 고속, 경량 모터 및 파워트레인 통합을 사용할 수 있습니다.
- 효율성 - 시스템 효율에는 회생 제동 모드에서 트랙션 인버터 효율, 모터 효율 및 인버터 효율이 포함됩니다.
- 성능 및 안정성 - 인버터 시스템의 성능은 모터 토크 제어, 전류 감지 루프 및 모터 토크 과도 응답을 통해 측정됩니다. 신뢰성에는 전력 모듈 안정성, 모터 안정성, 절연 등이 포함됩니다.
- 시스템 비용 - 전기 장비 및 와이어링 하니스와 별도로 주요 구성품에는 다음이 포함됩니다.
  - EMI 필터
  - DC 링크 커패시터
  - 버스 바
  - MCU와 제어 전자장치
  - 전원 모듈 및 구동 단계 전자 장치
  - 전류 센서
  - 인버터 하우징 및 냉각

## 2 아키텍처와 트렌드

트랙션 인버터의 아키텍처는 차량 유형에 따라 다릅니다. 플러그인 하이브리드 전기 자동차(PHEV) 및 배터리 전기 자동차(BEV)에는 전력 수준이 100~500kW 범위인 3상 전압 소스 인버터 토폴로지가 있습니다. 배터리 팩은 인버터 DC 입력에 직접 연결하거나 DC/DC 부스트 컨버터를 사용하여 배터리 전압을 높이고 제어된 DC 전압으로 인버터에 전원을 공급할 수 있습니다.

2레벨 인버터는 전기 자동차와 업계에서 가장 일반적으로 사용되는 전력 컨버터로, 수십 킬로와트부터 수백 킬로와트까지의 전력 범위를 지원합니다. 보통 스위칭 주파수는 5kHz~30kHz 범위이며, 현재 3레벨 인버터는 더 높은 전력 용량(300kW 이상), 더 높은 효율, 더 낮은 고조파 왜곡을 제공하며 더 작은 전자기 간섭(EMI) 필터를 사용할 수 있기 때문에 더 널리 사용되고 있습니다. 많은 토폴로지 중에서 중립점 클램프 및 T형 중립점 클램프(TNPC)가 가장 경쟁력 있는 설계입니다. **그림 2-1**에서는 3레벨 TNPC 인버터의 예를 보여줍니다.

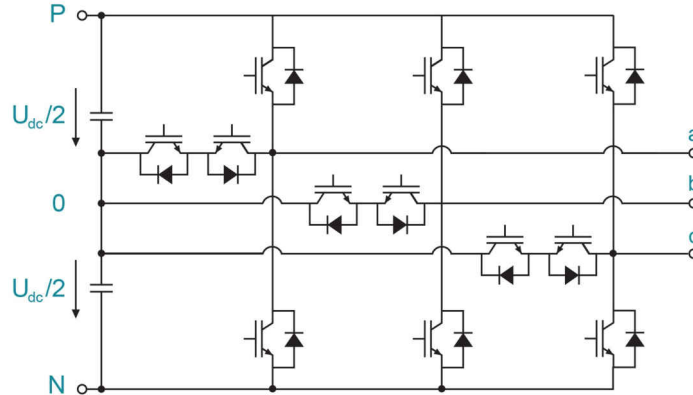


그림 2-1. 3레벨 T형 인버터

두 번째 트렌드는 듀얼 모터 아키텍처입니다. 2012년 초에 Tesla는 85kWh 배터리 팩으로 최대 426km의 주행 범위를 갖춘 전륜 구동 럭셔리 세단인 모델 S를 소개했습니다. 2014년에 Tesla는 전후방 차축에 전기 모터가 장착된 모델 S의 전륜 구동 버전을 발표했습니다. 그 이후로 듀얼 인버터는 Chevy Volt PHEV, Toyota Prius HEV 및 Cadillac CT6 PHEV와 같은 다양한 OEM에 의해 구현되었습니다.

시스템 통합을 개선하는 세 번째 트렌드는 전자 기기, 전기 모터 및 변속기를 소형 시스템 하우징에 결합하는 E-액슬을 구현하는 것입니다. E-액슬은 모터 성능을 향상시킵니다. 이 설계로 예를 들어 20k RPM 이상의 토크와 최고 속도를 달성할 수 있기 때문입니다. 더 나은 냉각 기능과 코일 권선 구조는 전력 밀도와 모터 효율을 개선합니다.

트랙션 인버터 기능의 기타 트렌드는 다음과 같습니다.

- 전력 수준 및 ASIL(차량용 안전 무결성 수준) 증가(100kW~500kW, ASIL C~ASIL D)
- 향상된 스위칭 과도 전압으로 800V 기술로 전환
- 게이트 드라이브 강도를 손쉽게 조정하여 오버슈팅 감소, 효율성 최적화 및 EMI 감소
- 리플버 대신 유도성 위치 센서 기술을 채택하여 비용 절감
- 게이트 드라이버 집적 회로(IC)에 능동 방전을 통합하여 비용을 줄이고 공간을 절약

### 3 트래션 인버터를 활성화하는 핵심 기술

트래션 인버터는 **절연 기술**, 저전압 영역에서 구현되는 기술 및 고전압 도메인에서 구현된 기술을 필요로 합니다. 절연 게이트 드라이버, 디지털 아이솔레이터, 절연 아날로그-디지털 컨버터 및 솔리드 스테이트 릴레이에서 볼 수 있는 TI의 정전식 절연 기술은 유전체로 이산화규소를 사용하는 정전식 회로에 강화 신호 절연을 통합하였습니다. **그림 3-1**은 트래션 인버터 시스템의 예를 보여줍니다. 절연 장벽(빨간색 점선)은 저전압 도메인과 고전압 도메인을 분리합니다.

저전압 영역에서 MCU(마이크로컨트롤러)는 전원 스위치에 PWM(펄스 폭 변조) 신호를 생성합니다. MCU는 폐쇄 루프에서 감지 및 속도 제어를 실행하고 호스트 기능을 처리하여 펄스 하드웨어 및 소프트웨어 보안과 안전한 코드 실행 요구 사항을 충족합니다. 또한 안전한 전원 트리를 구현하면 MCU와 중요한 전원 레일의 전원이 끊기지 않습니다. 12V 자동차 배터리에 연결된 PMIC(전원 관리 통합 회로) 또는 시스템 기반 칩 MCU에 전원을 공급합니다. MCU는 리튬버 또는 홀 효과 센서의 아날로그 프론트 엔드와 상호 작용합니다.

고전압 영역의 주요 기능은 다음과 같습니다.

- 전원 스위치 - 일반적으로 SiC(실리콘 카바이드) 또는 IGBT(절연 게이트 양극 트랜지스터) 기반 전원 모듈은 보호 및 모니터링 기능을 통해 절연 게이트 드라이버에 의해 제어됩니다
- 절연 게이트 드라이버 - 절연 장치를 통해 고전압 영역으로부터 흐르는 위험한 DC 또는 제어되지 않은 과도 전류를 방지하면서 고전압 장치와 저전압 장치 간에 데이터 및 전력 전송이 가능합니다.
- 바이어스 전원 - 저전압 측에서 입력을 받아 전원 스위치에 대한 게이트 드라이브 전압을 생성하는 갈바닉 절연 전원 공급 장치입니다
- 절연 전압 및 전류 감지 - DC 링크 전압 및 모터 위상 전류를 감지하고 모터에 올바른 토크가 적용되도록 합니다
- 능동 방전 - DC 버스 커패시터 전압을 안전한 전압으로 방전합니다. 역기전력(EMF)을 생성할 수 있는 모터 유형에 대해 활성 방전이 필요합니다. 유엔 유럽경제위원회(EEA)의 유엔 규정 제 94호(UN)는 DC 버스 콘덴서 전압이 5초 이내에 안전한 전압(60V)으로 떨어지도록 요구하고 있습니다. 또한 시스템 고장을 방지하기 위해 중요한 기능에 대한 자체 테스트를 수행하는 진단 회로가 포함되어 있습니다.

인버터 제어 및 안전 체계도 차량 유형에 따라 다릅니다. 예를 들어 PMSM은 고효율, 낮은 토크 리플, 넓은 속도 범위를 가지고 있기 때문에 영구자석 동기 모터(PMSM)를 활용할 수 있습니다. PMSM은 필드 지향 제어라고도 하는 페이스 벡터 PWM 제어를 사용하는 경우가 많습니다. 로터 자기에 수직인 고정자 벡터를 생성하는 방식으로 고정자 전류를 제어하면 토크가 생성됩니다. 고정자 전류를 업데이트하면 고정자 플럭스 벡터가 항상 로터 자석에 대해 90도 각도로 유지됩니다. PHEV 및 BEV의 다른 인기 있는 모터 유형에는 인덕션 모터, 외부 자극 동기 기계 및 스위치 자기 저항 기계가 포함됩니다.

값비싼 희토류 재료의 영구 자석을 줄이기 위해 외부에서 여자되는 동기 모터(EESM)는 보조 액셀뿐 아니라 차량의 기본 액셀 무버로 성장하고 있습니다. 이 모터를 사용하는 목적은 비용을 줄이는 것입니다. 예를 들어 100kW 최대 전력 요구량은 약 1.5kg의 자석이 필요하고 제조 및 유지보수 노력을 줄이는 것입니다. EESM 시스템 유형에는 전도성 EESM 및 인덕티브 EESM(iEESM)이 있습니다. EESM을 사용하는 상용 차량에는 Toyota Prius, Chevrolet Bolt EV, Ford Focus Electric, VW e-Golf, BMW iX3, 등이 있습니다.

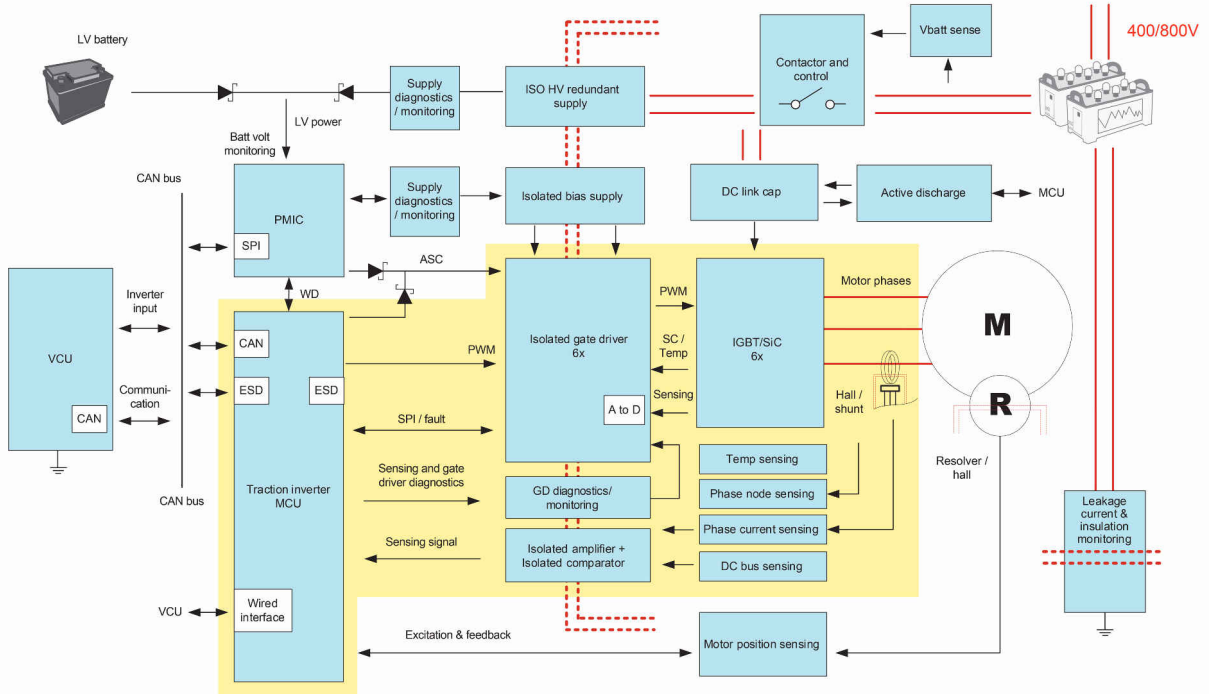


그림 3-1. 트랙션 인버터 시스템 블록 다이어그램

## 4 마이크로컨트롤러

인버터 아키텍처 및 사양을 정의한 상태에서 다음 단계는 MCU를 선택하는 것입니다. TI는 Arm® Cortex® R5F 기반 Sitara 제품군과 실시간 제어 기능 및 빠른 제어 루프를 갖춘 고성능 C2000™ MCU 제품군을 포함하여 HEV 및 EV 응용 제품을 위한 강력한 **마이크로 컨트롤러** 포트폴리오를 제공합니다.

### 4.1 Sitara 제품군

**Sitara MCU 제품군**의 Arm Cortex-R5F 클러스터에는 R5F 코어 2개가 포함되어 있습니다. 코어 주변에는 L1 캐시 및 TCM(긴밀하게 결합된 메모리), 표준 Arm CoreSight™ 디버그 및 트레이스 아키텍처, 통합 VIM(벡터 인터럽트 관리자), ECC 애그리게이터 및 기타 다양한 모듈과 같은 메모리가 함께 제공됩니다. 실시간 제어용 가속기가 기존 C2000 제어 모듈을 상속합니다. 이 가속기에는 아날로그-디지털 컨버터(ADC), 아날로그 콤파레이터, 버퍼 디지털-아날로그 컨버터, 향상된 펄스폭 모듈레이터(EPWM), 향상된 캡처, 향상된 직교 인코더 펄스, 빠른 직렬 인터페이스, 시그마 델타 필터 모듈, 크로스바가 포함되어 있습니다. 그 밖의 장점은 다음과 같습니다. 분할 안전 분해를 위한 유연한 락스텝 옵션, HSM(하드웨어 보안 모듈), AUTOSAR을 사용한 CAN-FD 지원. AM2634-Q1에서 제어되는 트랙션 인버터 시스템 블록 다이어그램은 **그림 4-1**에 나와 있습니다.

Code Composer Studio™ 소프트웨어 프로젝트 폴더에는 트랙션 인버터 데모 코드가 포함되어 있습니다. 리졸버 루프는 다음과 같이 구현됩니다. 하나의 PWM 채널이 직접 메모리 액세스 및 높은 주파수에서 DAC(디지털-아날로그 컨버터)를 통해 리졸버 여자 신호에 대한 업데이트를 트리거하도록 설정되고, 다른 세 개의 PWM 채널은 인버터 신호를 생성하고 ADC SOC를 생성합니다. 리졸버 여자 신호는 DAC에서 원하는 ADC 샘플 위상으로 정렬됩니다. 여러 ADC 장치가 동일한 SOC(System on Chip)를 공유할 수 있습니다.

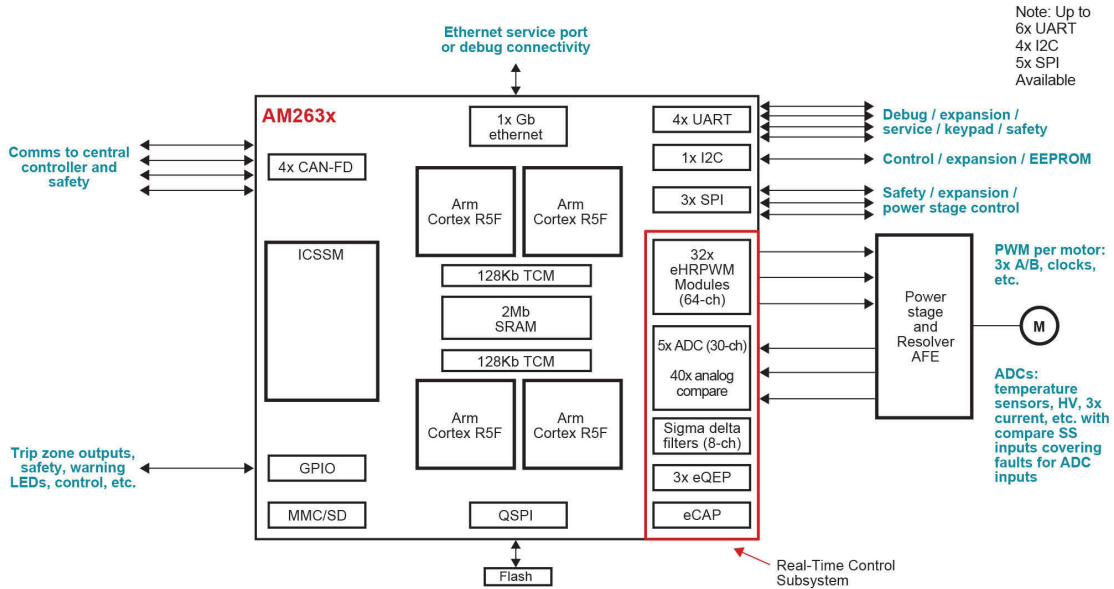


그림 4-1. AM2634-Q1이 장착된 트랙션 인버터 시스템 블록 다이어그램

## 4.2 실시간 제어 MCU

**TI C2000 MCU** 제품군은 20년 이상 디지털 전원 및 모터 제어 애플리케이션에서 최고의 실시간 제어 성능을 제공해 왔습니다. 이러한 MCU는 플래시 메모리, ADC(아날로그-디지털 컨버터), DSP(디지털 신호 프로세서) 및 PWM(펄스 폭 변조) 장치를 통합하며 TMS320F28003x 및 TMS320F2837x와 같이 매우 성공적입니다. C2000 제품군의 기능은 독립형 인버터부터 다음을 포함한 전체 파워트레인 통합까지 다양합니다. 트랙션 인버터, 온보드 충전기(OBC), 고전압 DC-DC 컨버터, 배터리 관리 시스템(BMS), 난방 환기 및 에어컨(HVAC)을 갖추고 있으며, 곧 출시될 F29x 제품군은 초당 수억 개의 명령(MIPS)을 제공할 수 있습니다.

TI C2000 MCU에는 트랙션 인버터를 위한 제어 알고리즘을 가속화하는 데 도움이 되는 다음과 같은 기능이 포함되어 있습니다.

- 주 DSP 코어 자속 기준 제어에서 독립적으로 코드를 실행할 수 있는 상태 시스템 기반 32비트 부동 소수점 제어 법칙 역 셸러레이터
- 이 제품군의 일부 디바이스에서 32비트 부동 소수점 연산 또는 64비트 부동 소수점 연산 지원
- 변환 및 토크 루프 계산에 일반적으로 사용되는 일반적인 삼각 수학 함수를 지원하는 고유의 명령을 제공하는 TMU(Trigonometric Math Unit). TMU 기반 명령어를 사용하면 사이클 카운트를 크게 줄일 수 있습니다. [그림 4-2](#)에서는 *트랙션 인버터 제어 알고리즘*에 대한 TMU를 통한 개선을 보여줍니다.
- 복잡한 수학 방정식에서 발견되는 Viterbi 및 순환 중복 검사 작업 모두에 대한 사이클 수 감소

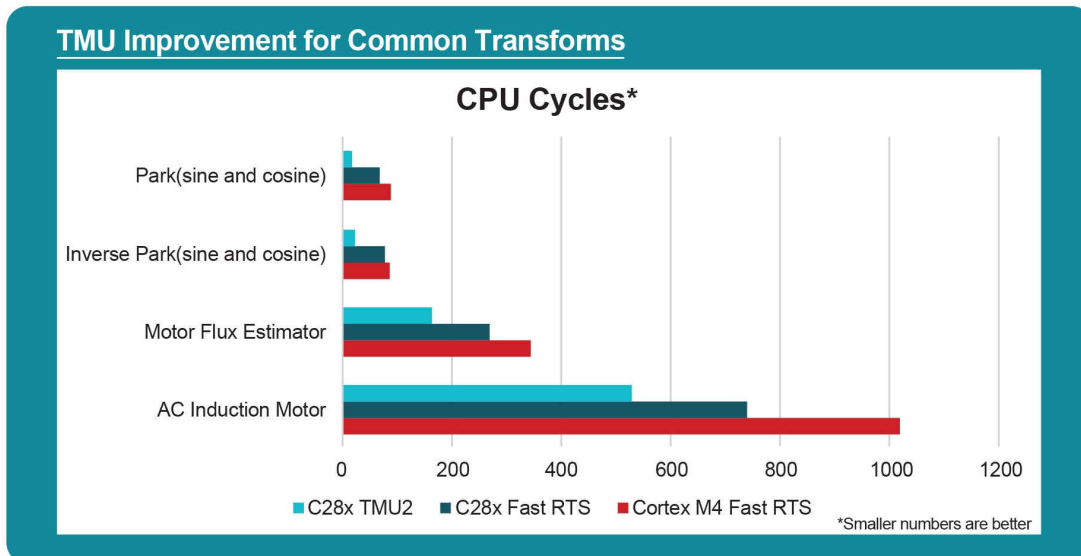


그림 4-2. 트랙션 인버터 제어를 위한 TMU 개선

## 5 절연 게이트 드라이버

**TI 게이트 드라이버 절연** - 최대 5.7kV<sub>RMS</sub> - 감전 사고로부터 보호하는 동시에 더 높은 작동 전압, 더 넓은 연면 및 클리어런스로 시스템 안정성 향상을 제공합니다. 두 가지 주요 절연 게이트 드라이버 제품군인 스마트 드라이버 UCC21750-Q1 제품군과 안전 드라이버 UCC5870-Q1 제품군이 있습니다. UCC21750-Q1 제품군은 빠른 과전류 및 단락 감지, 셉트 전류 감지 지원, 고장 보고, 능동 밀러 클램프, 입력 및 출력 측 전원 공급 부족 전압 잠금 감지와 같은 트래션 인버터의 전력 모듈을 위한 보호 기능을 포함하고 있습니다. 절연된 아날로그-PWM 센서는 더 쉬운 온도 또는 전압 감지를 지원합니다.

**UCC5870-Q1** 드라이버 제품군에는 다음 기능이 포함되어 있습니다.

- 기능 안전 준수, 절연, 단일 채널 게이트 드라이버, 최대 1kV<sub>RMS</sub> 작동 전압 및 40년 이상의 절연 장벽 수명 지원, 낮은 부품 간 스큐 및 >100V/ns 공통 모드 잡음 내성(CMTI) 제공
- 전력 스위칭 손실을 최소화하고 드라이브 회로의 버퍼 회로를 제거하므로 비용을 절감할 수 있는 높은 30A 피크 구동 강도를 제공합니다.
- 전원 모듈의 온도를 모니터링하고 특정 온도 제한까지 작동할 수 있도록 하는 온도 센서로 광범위한 작동 범위를 지원합니다.
- 밀러 클램프가 있어 오회전을 방지하고 효율성 목표를 달성하기 위해 필요한 만큼 신속하게 스위치를 스위칭할 수 있습니다.

그림 5-1 및 그림 5-2은 다음 테스트 조건에서 UCC5870-Q1의 30A 드라이브 강도와 경쟁 디바이스를 표시합니다.

- Vcc2 - Vee2 = 23V
- R<sub>gon</sub> = R<sub>goff</sub> = 0Ω
- 부하 커패시턴스 = 1μF

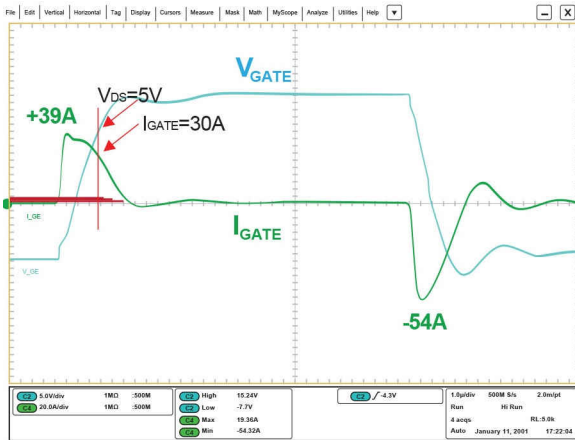


그림 5-1. UCC5870-Q1 게이트 드라이브 강도

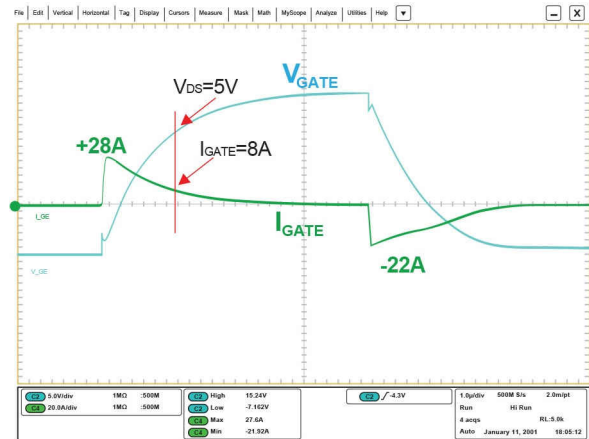


그림 5-2. 경쟁 장치 게이트 드라이브 강도

트래션 인버터 효율성을 개선하고 EMI를 줄이는 한 가지 방법은 회전을 제어하기 위해 게이트 드라이브 출력을 조정하여 온도, 부하 및 전압과 같은 다양한 조건에서 스위칭 속도를 변경하는 것입니다. 예를 들어 배터리 전압을 낮출 때 과도 전압 (dv/dt)은 자연적으로 작으며 게이트 드라이브 출력을 조정하여 스위치를 더 빠르게 전환할 수 있습니다.



그림 5-3 및 그림 5-4는 UCC5870-Q1에 기반을 둔 조정 가능한 게이트 드라이브 구현을 보여줍니다. 그림 5-3은 설계 다이어그램을 보여주며 그림 5-4은 Company WolfSpeed의 XM3 하프 브리지 전원 모듈 제품군에 연결된 설계 보드를 보여줍니다.

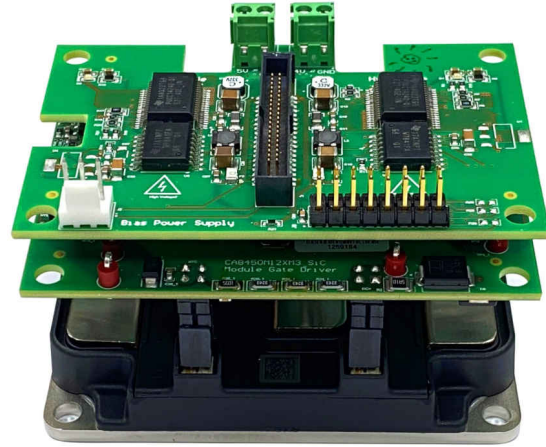
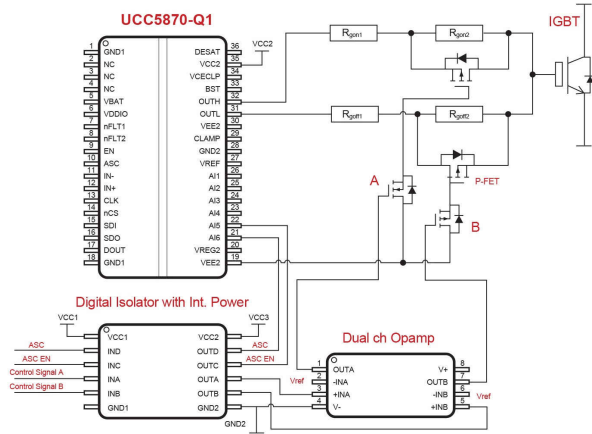


그림 5-3. UCC5870-Q1 조정 가능한 게이트 드라이브를 구현한 설계 다이어그램

그림 5-4. UCC5870-Q1 조정 가능한 게이트 드라이브를 구현한 설계 보드

그림 5-5 및 그림 5-6은 이중 펄스 테스트 파형을 보여줍니다. 상승 에지의 평균 스위칭 dv/dt 속도는 4.6kV/μs에서 21kV/μs로 증가했습니다. 하강 에지의 평균 스위칭 dv/dt 속도는 3.8kV/μs에서 13.5kV/μs로 증가했습니다.

다음 두 이미지 모두 800V 버스에서 이중 펄스 테스트 파형으로 수집되었습니다.



그림 5-5. 5.5Ω 게이트 저항을 사용한 약한 드라이브



그림 5-6. 0.5Ω 게이트 저항을 사용하는 강한 드라이브

표 5-1은 400V 버스 전압에서 약한 구동(5.5Ω 게이트 저항)과 강한 구동 전류(0.5Ω 게이트 저항)의 스위칭 에너지 비교를 보여줍니다.

표 5-1. 400V 버스 전압에서의 스위칭 에너지 비교

매개 변수	약한 드라이브 (5.5Ω 게이트 저항)	강한 드라이브 (0.5Ω 게이트 저항)
드레인-소스 전압	400 V	400 V
드레인-소스 전류	200 A	200 A
턴온 에너지	2.364 mJ	893 μJ
턴오프 에너지	2.12 mJ	898 μJ
드레인-소스 전압(V <sub>DS</sub> ) 오버슈트	88 V	150 V

표 5-2는 800V 버스 전압 미만의 약한 드라이브와 강한 드라이브 전류 사이의 스위칭 에너지를 비교한 것입니다.

표 5-2. 800V 버스 전압에서의 스위칭 에너지 비교

매개 변수	약한 드라이브 (5.5Ω 게이트 저항)	강한 드라이브 (0.5Ω 게이트 저항)
드레인-소스 전압	800 V	800 V
드레인-소스 전류	400 A	400 A
턴온 에너지	2.03 mJ	1.124 mJ
턴오프 에너지	2.0 mJ	1.245 mJ
드레인-소스 전압( $V_{DS}$ ) 오버슈트	120 V	230 V

## 6 저전압 바이어스 공급 장치

트랙션 인버터에서 **저전압 바이어스 전원 공급 장치**는 일반적으로 12V 배터리와 같은 저전압 소스에 연결되고 게이트 드라이버에 전원을 공급합니다. TI는 FET(전계 효과 트랜지스터) 및 통합 자성을 갖춘 컨버터, FET 및 외부 자성을 갖춘 컨버터, 외부 FET 및 외부 자성을 갖춘 컨트롤러를 비롯한 다양한 솔루션을 제공합니다.

UCC14240-Q1 절연 DC/DC 컨버터 모듈은 105°C의 주변 온도에서 1.5W의 출력 전력을 제공하며, ±1.3%의 출력 전압 조정을 제공합니다. 이 디바이스에는 기본 및 강화 절연 버전과 150V/ns 이상의 공통 모드 과도 내성 성능이 있습니다. [그림 6-1](#)은 로우 프로파일, 3.5mm 와이드 바디 SOIC 통합 패키지에 포함된 UCC14240-Q1의 (EVM) 보드 이미지를 보여줍니다.

UCC25800-Q1 디바이스는 초저 EMI 방출을 지원하는 인덕터-인덕터-커패시터 공진 컨버터입니다. 이 장치를 사용하면 누설 인덕턴스가 높은 변압기를 활용할 수 있지만, 조정 가능한 과전류 보호, 입력 과전압 보호, 과열 보호 및 핀 고장 방지와 같은 보호 기능이 훨씬 작은 기생 1차-2차 커패시턴스는 훨씬 작은 변압기로 활용할 수 있습니다.

SN6507-Q1은 MOSFET이 통합된 고주파 푸시-풀 변압기 드라이버로, 광범위한 입력 전압 범위를 지원하는 듀티 사이클 제어를 제공합니다. 이 디바이스는 위상에서 스위칭하는 0.5A NMOS 전원 스위치 2개와 컨트롤러 1개를 통합합니다. 이 디바이스에는 프로그래머블 소프트 시작, 확산 스펙트럼 클럭킹, 핀 구성 가능 회전을 제어도 포함되어 있습니다.

LM2518x-Q1 제품군은 전원 스위치가 통합된 1차측 조정(PSR) 플라이백 컨버터로, 4.5V~42V의 넓은 입력 전압 범위에서 작동할 수 있습니다. 절연 출력 전압은 1차측 플라이백 전압에서 샘플링되므로 오토커플러, 전압 레퍼런스의 필요성을 없애줍니다. 제어 변압기에서 3차 권선이 있는 것을 볼 수 있습니다. BCM(경계 전도 모드) 스위칭은 소형 자기 설계를 지원하며, ±1.5% 이상의 부하 및 라인 조정 성능을 제공합니다.

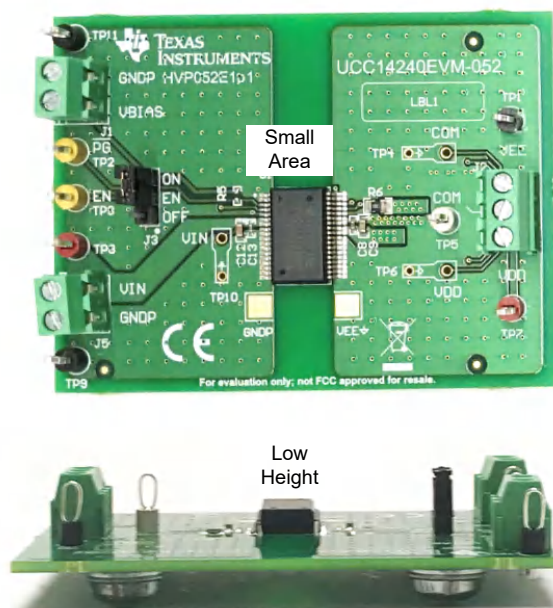


그림 6-1. UCC14240-Q1 EVM 보드

## 7 고전압 바이어스, 중복 공급 장치

트랙션 인버터 시스템에는 종종 고전압 전원 공급 장치가 필요합니다. 이 전원 공급 장치는 고전압 배터리의 전력을 변환하고 저전압 측에 연결하여 중복 전원 경로를 생성하고 안전성을 높입니다. 이 고전압 전원 공급 장치는 입력 전압이 50V보다 낮을 때 시동해야 할 수 있으며, 800V 배터리의 경우 1kV까지 작동할 수 있어야 합니다. 차량 충돌 후 또는 트랙션 인버터 고장으로 인해 고전압 배터리가 분리되는 경우 낮은 시동 전압이 발생할 수 있습니다. 모터는 회전하기 시작하고 제너레이터처럼 작동하여 비제어 전압을 DC 버스로 유도합니다. 전압이 50V(터치에 안전)를 초과하지 않도록 전압을 제어하려면 보조 전원 공급 장치가 DC 링크 캡(능동 방전)을 방전하거나 모터를 능동적으로 단락시킬 수 있는 안전 관련 회로를 켜고 전원을 켜야 합니다.

TI는 이러한 요구 사항을 충족하기 위한 다양한 레퍼런스 설계를 제공합니다.

1. 텍사스 인스트루먼트, [UCC28C5y-Q1 EVM: 40V - 1kV 입력, 15Vout, 40W PSR 플라이백](#)
2. 텍사스 인스트루먼트, [TIDA-01505 - 희생 제동 테스트를 지원하는 오토모티브 40V~1kV 입력 플라이백 레퍼런스 설계](#)
3. 텍사스 인스트루먼트, [PMP22288 - 오토모티브 인버터 전원을 위한 15W 플라이백 레퍼런스 설계](#)
4. 텍사스 인스트루먼트, [PMP10200 - 매우 넓은 입력 전압 범위 PSR 플라이백 컨버터 레퍼런스 설계](#)

## 8 DC 링크 활성 방전

모든 EV 트랙션 인버터는 안전에 중요한 기능으로 DC 링크 활성 방전을 필요로 합니다. 방전 회로는 다음 조건 및 요구 사항에 따라 DC 링크 커패시터의 에너지를 방전하는 데 필요합니다.

- 긴급 상황이나 수리 중에 시스템의 전압은 2초 이내에 안전하게 접촉할 수 있어야 합니다.
- 차량 키오프 시 DC 링크 커패시터는 방전된 상태로 유지되어야 합니다.
- 시스템 수준 안전 요구 사항 ASIL D
- MCU 고장 시 MCU와 독립적으로 작동할 수 있어야 합니다

TI는 여러 시스템 수준 요구 사항을 대상으로 하는 몇 가지 활성 방전 설계를 보유하고 있습니다.

- [TPSI3050-Q1](#)을 사용한 전원 트랜지스터 켜기, 끄기 제어. TPSI3050-Q1 강화 절연 스위치 드라이버에는 2차 바이어스 전원이 필요 없이 방전 전원 스위치를 구동할 수 있는 통합 10V 게이트 공급 장치가 있습니다.
- AFE539F1-Q1 디바이스를 사용하여 제어되는 PWM AFE539F1-Q1 스마트 AFE에는 PWM 및 맞춤형 파형 제너레이터를 위한 비휘발성 메모리가 내장되어 있습니다. 이 디바이스는 프로그래밍 기능 및 로직을 추가하여 DAC 기반 회로, MCU 기반 회로 및 완전히 분리된 회로 간의 차이를 메우는 소프트웨어가 필요 없습니다. [그림 8-1](#) 및 [그림 8-2](#)에서는 설계 블록 다이어그램과 테스트 파형을 보여줍니다.

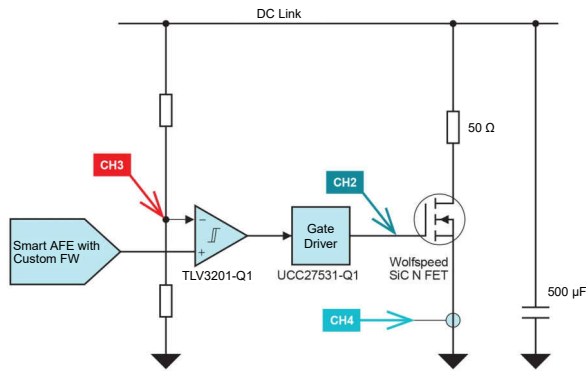
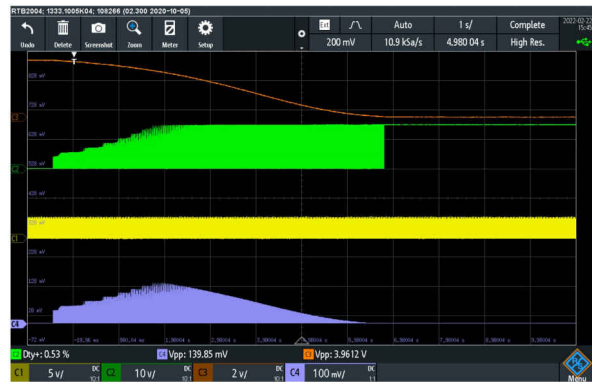


그림 8-1. 스마트 AFE를 기반으로 하는 DC 링크 활성 방전



- CH1: AFE539F1-Q1 출력
- CH2: 게이트 드라이버(UCC27531-Q1) PWM 출력
- CH3: 저항성 분할기
- CH4 이후의 DC 링크 전압: SiC FET 드레인-소스 전류

그림 8-2. 파형 테스트

- 전원 모듈에서 선형 바이어싱 또는 PWM 기반 펄스 선형 스위칭으로 전력계를 통해 방전하여 단락을 구성합니다. 3중 상태 기능을 지원하는 TI의 절연 게이트 드라이버는 개별 아날로그 회로를 사용하는 전원 모듈을 통해 능동 방전을 지원합니다. 방전 프로파일은 커패시터의 전류 소스 레퍼런스에 미러링되며, 100-μA 정전류 싱크는 1A 정전류 전류를 나타냅니다. 게이트 전압 레귤레이터는 게이트-소스 전압을 조정하고 전원 모듈을 선형 영역으로 구동합니다.

- 모터 권선을 통한 에너지 방전. 권선 기반 방전을 여러 단계로 나눌 수 있습니다. 이러한 단계에는 빠른 방전 단계 또는 버스 전압 조정 단계가 포함됩니다. 큰 D축 전류를 신속하게 생성하면 DC 링크 에너지가 감소되며, q축 전류는 0이 되어야 합니다. TI의 Sitara 또는 C2000 MCU의 빠른 루프 제어 및 안전 절연 게이트 드라이버에는 SPI(직렬 주변 기기 인터페이스) 프로그래밍 기능이 포함되어 있으며, 6개의 ADC 채널은 안정적이고 원활하게 제어되는 방전을 제공합니다.

## 9 모터 위치 감지

모터 로터 위치 센서는 로터 샤프트의 각도 위치를 측정합니다. 모터 위치 센서는 EV 애플리케이션의 안전 요구 사항을 충족하는 속도 피드백 루프 제어에 매우 중요합니다. 위치 제어를 위해 이 센서는 알려진(안전) 위치, 모터 속도 및 동작 전반의 위치를 가능하게 하며, 토크 제어 루프에 피드백을 제공합니다.

가변 자기 저항 리졸버 센서는 회전 변압기의 원리를 구현합니다. 변압기는 하나의 1차 권선과 2차 권선이 서로 직각으로 배치되어 있습니다. 1차 권선(TI의 [ALM2403-Q1](#) 또는 [TAS5431-Q1](#)과 같은 여자 증폭기를 통해 생성)에 여자 전압( $V_{EXC}$ )을 적용하면 자기 플럭스( $\phi$ )를 생성하는 전류가 발생합니다. 플럭스는 로터 각도( $\theta$ )에 따라 2차 권선을 통해 분배되며 그에 따라  $V_{SIN}$  및  $V_{COS}$ 를 유도합니다. 피드백 신호는 차동 신호에서 ADC의 단일 종단 출력으로 변환됩니다. 안전 MCU는 리졸버 2차 권선의 전압 비에서  $\theta$ 를 계산합니다.

유도성 위치 센서는 고속 모터 위치 감지에 사용할 수 있는 자력의 영향을 받지 않는 기술을 구현합니다. 센서는 와전류 원리를 사용해 코일 세트 위로 움직이는 금속 대상의 위치를 감지합니다. 위치 센서 인터페이스 IC는 RX 코일의 입력 신호를 MCU에서 처리하는 차동 사인 및 코사인 출력 신호로 변환합니다.

## 10 절연 전압/전류 감지

트랙션 인버터 시스템은 DC 링크 전압 및 모터 위상 전류와 같은 전압 및 전류 측정을 위해 **절연 센서**를 사용합니다. TI의 AMC1311B-Q1 및 AMC1351-Q1 절연 증폭기와 AMC1305-Q1 절연 모듈레이터 기반 설계는 절연 전류 및 전압 감지에 대한 높은 정확도, 고대역폭, 낮은 지연 시간 및 낮은 온도 드리프트를 달성하는 데 도움이 됩니다. 이 제품군은 기본 절연 등급과 강화 절연 등급을 모두 제공합니다. 이산화규소 기반 정전식 절연 장벽은 높은 수준의 자기장 내성을 지원합니다.

## 11 시스템 엔지니어링 및 레퍼런스 설계

TI의 시스템 엔지니어링 팀은 TI의 광범위한 제품 포트폴리오에서 최적화된 시스템 설계를 개발하여 고객이 시스템 설계 주기를 단축할 수 있도록 지원하고 있습니다. 다음 목록에는 이전에 개발된 일부 레퍼런스 설계가 자세히 설명되어 있습니다.

- [TIDM-02009](#):

TIDM-02009는 ASILD 안전 개념 평가, 고속 트랙션, 양방향 DC/DC 변환 레퍼런스 설계입니다.

이 레퍼런스 설계는 단일 TMS320F28388D 실시간 C2000™ MCU를 통해 HEV/EV 트랙션 인버터 및 양방향 DC-DC 컨버터를 제어하는 방법을 보여줍니다. 트랙션 컨트롤은 소프트웨어 기반의 리졸버-디지털 컨버터(RDC)를 사용하여 모터를 최대 20,000RPM의 고속으로 구동합니다. DC-DC 컨버터는 위상 전환 풀 브리지(PSFB) 토폴로지 및 동기 정류(SR) 스키마와 함께 PCMC(피크 전류 모드 제어) 기술을 사용합니다. 트랙션 인버터 스테이지는 UCC5870-Q1 스마트 게이트 장치로 구동되는 SiC(실리콘 카바이드) 전력계를 사용합니다. PCMC 파형은 최신 PWM 모듈과 CMPSS(컴퍼레이터 서브시스템)의 내장 기술기 보상을 사용하여 생성됩니다. 시스템의 ASIL 분해 기반 기능 안전 개념은 TÜV SÜD로 평가되어 대표적인 안전 목표에 대해 최대 ISO 26262 ASIL D의 시스템 수준 안전 무결성을 입증했습니다.

- [PMP22817](#):

PMP22817은 통합 변압기 레퍼런스 설계가 적용된 차량용 SPI 프로그래밍이 가능한 게이트 드라이버 및 바이어스 공급 장치입니다.

이 레퍼런스 설계는 트랙션 인버터에서 전력 스위치를 위한 절연 바이어스 전원 및 절연 게이트 드라이버를 제공합니다. 바이어스 전원과 드라이버는 모두 800VDC 버스 애플리케이션에 필요한 높은 절연을 제공합니다. 절연 바이어스가 24VDC에 +15V 및 -5V 게이트 드라이브 바이어스를 제공합니다. 절연 드라이버는 이러한 고전력 스위치를 신속하게 켜고 끄는 데 필요한 높은 전류를 제공하며 고급 보호 기능을 제공합니다. PMP22817 설계는 또한 조정된 24V를 제공하는 테스트를 거친 DC-DC 단일 종단 1차 인덕터 컨버터 SEPIC 오프 오토모티브 배터리 전압(서지 및 전압 강하 포함 6V~42V)을 제공합니다.

- [TIDA-01527](#)

TIDA-01527은 C2000™ 마이크로컨트롤러 및 ±0.1° 정확성을 갖춘 개별 리졸버 프론트 엔드 레퍼런스 설계입니다.

이 레퍼런스 설계는 리졸버 센서를 위한 여자 증폭기 및 아날로그 프론트 엔드입니다. 이 설계는 1-in-2 PCB(인쇄 회로 보드)에 개별 부품과 표준 연산 증폭기만 구현합니다. 제공된 알고리즘 및 코드 예제에서는 신호 처리 및 각도 계산을 위해 TMS320F28069M MCU와 함께 C2000 마이크로컨트롤러(MCU) 론치패드™ 개발 키트를 사용합니다. 이 레퍼런스 설계는 뛰어난 산란 신호 처리 방법을 사용합니다. 이 방법을 사용하면 하드웨어 비용과 복잡성을 적정 수준으로 유지하면서 시스템 정확도를 250% 향상시킬 수 있습니다.

## 12 결론

오토모티브 트랙션 인버터는 800V 기술, 높은 전력 밀도(50kW/L 이상), 고효율(>99%), 높은 안전(ASILD) 요구 사항을 요구하는 추세입니다. TI 기술 및 디바이스(예: MCU, 절연 게이트 드라이버, 절연 바이어스 공급 장치, 안전 PMIC, 능동 방전, 위치 감지, 절연 전압 및 전류 센서)는 향상된 신뢰성과 저렴한 비용으로 고성능의 안전한 트랙션 인버터 시스템을 구현합니다.

## 13 참고 문헌

SW 벤치마크를 포함하여 C2000이 실시간 신호 체인에서 제공하는 이점에 대한 자세한 내용은 [C2000™ 제어 MCU의 최적화된 신호 체인](#) 애플리케이션 노트를 보여주는 실시간 벤치마크를 참조하십시오.

스마트 AFE에 대한 자세한 내용은 [스마트 DAC란?](#) 기술 문서를 참조하십시오.

[높은 신뢰도와 합리적인 가격대의 절연 기술 개발과 관련한 고전압 설계 문제의 해결](#) 백서를 참조하십시오.

## 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](http://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 © 2022, Texas Instruments Incorporated