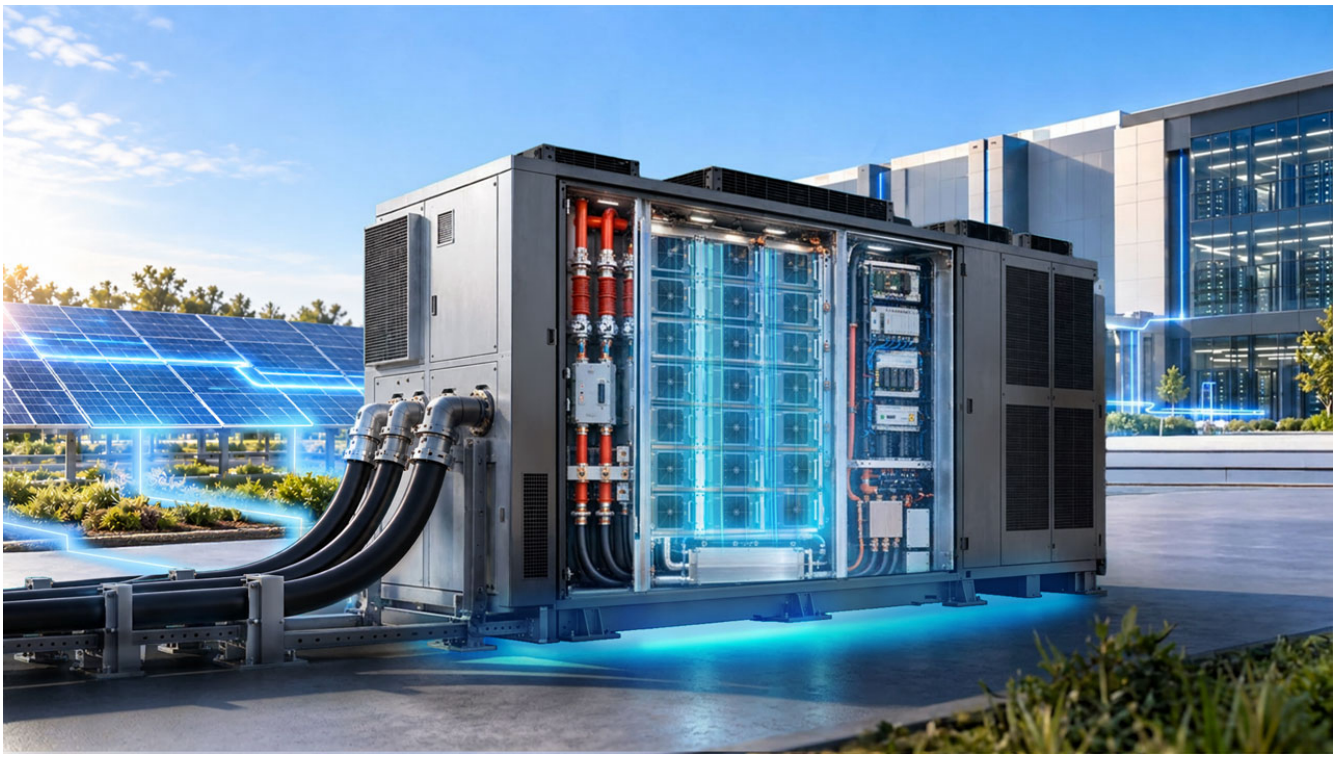
Technical Article

그리드 규모 전력 공급을 새롭게 바꿀 솔리드 스테이트 변압기

Harald Parzhuber, 그리드 인프라 및 전력 공급 시스템 관리자

- SST(솔리드 스테이트 변압기)를 사용하면 35kV, 6MW까지 확장되는 효율적이고 콤팩트한 전력 공급이 가능해집니다.
- SiC(실리콘 카바이드) 기술이 발달하면서 데이터 센터, EV(전기차) 충전 및 에너지 저장 분야에서 SST가 도입되는 속도가 빨라지고 있습니다.



SST는 오래전부터 전력 변환 효율을 개선하고 시스템 크기를 줄이며 유연한 전력 아키텍처를 구현할 수 있는 잠재력을 지닌 기술로 평가받아 왔습니다. 최근까지만 해도 기술적, 경제적 제한으로 인해 널리 도입되지 못했지만 최대 3.3kV에 달하는 정격 전압을 지원하는 고급 SiC 전원 장치가 등장하면서 이러한 장벽을 극복할 수 있게 되었습니다. 이 장치를 사용하면 더 높은 스위칭 주파수, 더 높은 DC-링크 전압과 적은 컨버터 셀을 구현할 수 있어 더 콤팩트한 아키텍처가 지원됩니다. SST를 개발할 때는 2MW~6MW의 전력 수준, 최대 35kV의 그리드 전압을 목표로 설정하기 때문에 엔지니어는 고급 컨버터 토폴로지, 고전압 절연, 실시간 제어, 안정적인 통신을 우선시해야 합니다.

이러한 기술적 역량은 데이터 센터, 메가와트급 EV 충전, 그리드 연결식 에너지 저장 등에서 SST 도입 확산을 촉진하고 있습니다. 데이터 센터의 경우 SST 기반 전력 아키텍처를 사용하면 그리드-그래픽 처리 장치 전력 공급 효율을 1퍼센트 포인트 이상 개선할 수 있습니다. AI(인공 지능) 컴퓨팅 랙 한 개의 소비 전력이 약 1MW라는 사실을 감안하면 작은 효율 향상이라도 대규모 데이터 센터 시설 전반에서는 의미 있는 에너지 절약으로 이어지게 됩니다.

그림 1에서는 저주파 변압기, 다단계 AC/DC 및 DC/DC 변환의 기존 방식에서 중전압 그리드에서 고주파 변압기를 통과해 최저 800V_{DC} 또는 1.5kV_{DC}까지 직접 변환하는 방식으로 아키텍처 변화를 보여줍니다.

English Document: SSZTDE9
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

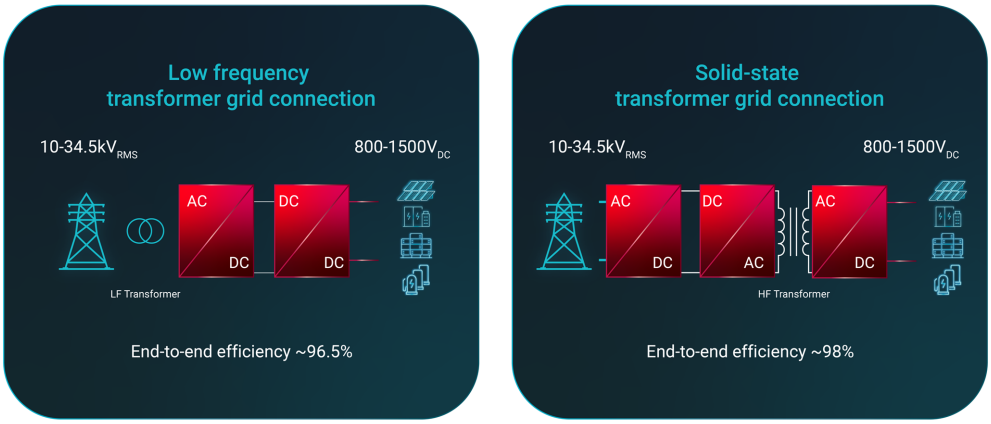


그림 1. 저주파 변압기 기반 그리드 연결과 SST 구현 시 효율 개선 효과 비교

SST가 저주파 변압기의 실질적인 대안이 되게 해준 변화

최신 SiC 장치는 높은 스위칭 주파수를 지원하면서도 전력 손실은 줄여 주어서 전반적인 시스템 효율을 개선합니다. 작동 주파수가 높으면 패시브 부품 크기를 줄일 수 있어서 설계를 더 콤팩트하게 하고 재료비를 절감할 수 있습니다. TI(텍사스 인스트루먼트)는 절연 게이트 드라이버, 절연 기술, 감지 솔루션 및 실시간 제어 기능을 내장해 이러한 시스템을 지원하여 대규모 SST 도입의 실현 가능성을 높이고 있습니다.

일반적인 SST 구현은 중전압 측(AC_{MV})에서 스택형 AC/DC 컨버터를 사용하고 저전압 측에서는 병렬 연결된 DC/DC 출력을 사용합니다(그림 2).

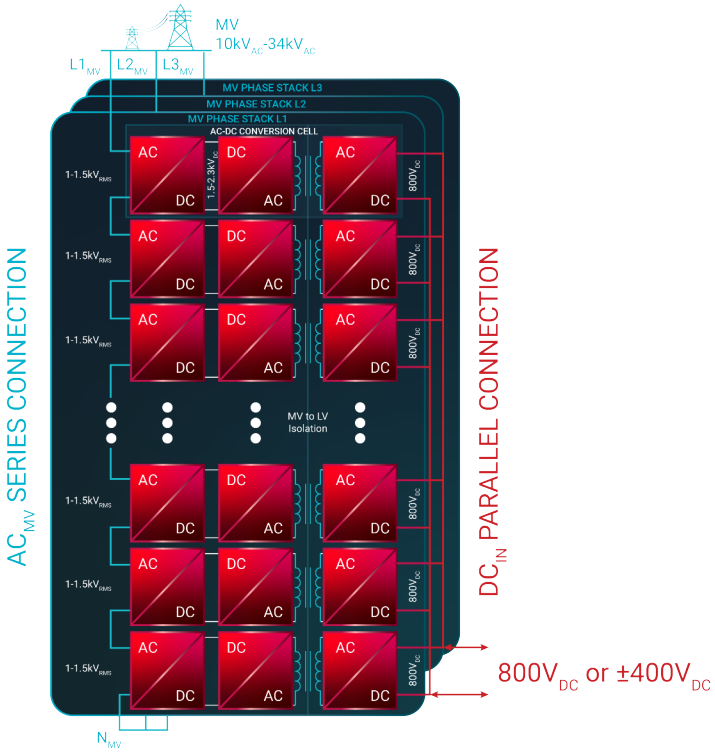


그림 2. 스택형 공기조화/기계환기 컨버터 및 병렬 저전압 출력을 지원하는 일반적인 SST 구현

전원 반도체의 항복 전압은 설계자가 SST 아키텍처를 구현하는 방식에 직접적인 영향을 미칩니다. 초창기 구현은 주로 1.7kV 전력 장치를 주로 사용했지만 정격 2.3kV 및 3.3kV SiC 모듈을 사용할 수 있게 되면서 시스템 설계가 크게 재편되었

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

습니다. 다시 말해 이러한 장치에서는 더 높은 DC 링크 전압을 사용할 수 있으므로 전체 셀 수를 줄일 수 있게 된 것입니다. 예를 들어 1.2kV 장치를 지원하며 컨버터 셀 100개가 필요한 SST라면 3.3kV SiC 장치를 사용해 셀 수를 약 50개로 줄일 수 있습니다. 이렇게 축소하면 시스템 설계가 간소해지고 실물 크기가 작아지며 모든 컨버터 셀이 중앙의 컨트롤러와 통신해야 하기 때문에 통신 아키텍처의 복잡성이 완화됩니다. 그림 3에서 SiC 전압 정격을 1.2kV에서 3.3kV로 늘리면 다양한 중전압 클래스에서 셀 수가 어떻게 스케일 다운되는지 확인할 수 있습니다.

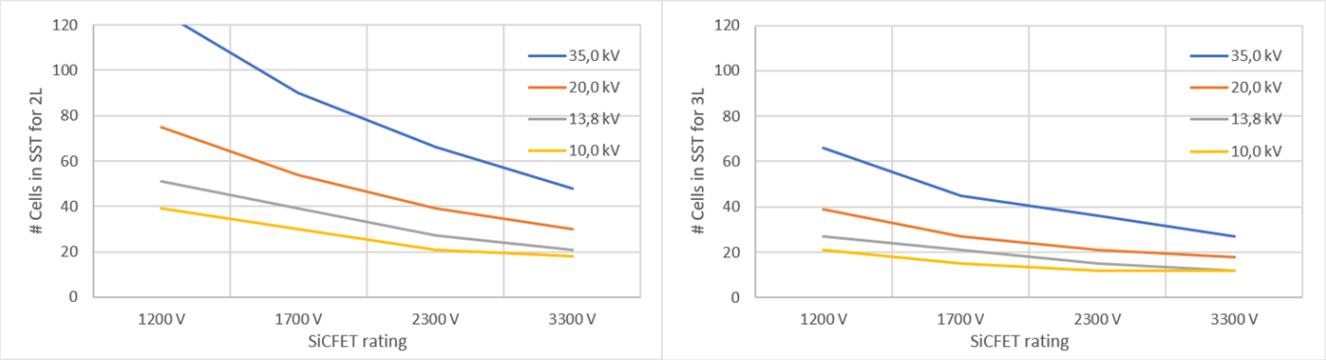


그림 3. SiC 정격에 따른 2L 및 3L 변환 셀의 셀 규모 조정

동시에 전력 밀도가 높아지고 스위칭 속도가 빨라지면서 이를 지원하는 전자 부품에 대한 요구사항도 더욱 까다로워지고 있습니다. 게이트 드라이버는 탈포화 감지와 같은 고급 보호 기능을 제공하고, 조정 가능한 회전율을 지원하고, 전력 모듈에 충분한 게이트 드라이브 전류를 공급해야 하며 최대 100V/ns에 달할 정도로 매우 높은 공통 모드 과도 내성 조건에서도 안정적으로 작동해야 합니다. 또한 개별 컨버터 셀 내부의 작동 전압이 2kV를 초과하면 절연 게이트 드라이버 구현에서도 캐스케이딩 절연 장벽과 같은 설계 기법을 적용해 안정적인 작동을 유지해야 합니다.

2.3kV~3.3kV 범위의 장치를 사용하면 아키텍처와 비용 간 실용적인 절충안이 될 수 있지만 이중화 전략에도 영향을 미칩니다. N+1 또는 N+2 위상 스택 구성에서 고전압 SiC 소자를 사용하면 이중화를 위해 추가하는 셀 하나당 설치 전력 용량과 비용의 증가 폭이 더 커집니다. 위상 스택 이중화에는 일반적으로 N+1 또는 N+2 구성이 사용되며 이를 통해 개별 셀에 장애가 발생하더라도 시스템이 계속 작동할 수 있습니다. 따라서 엔지니어는 셀 수를 줄이는 것과 중복 장치가 발생할 때마다 늘어나는 비용 사이에서 균형을 잘 잡아야 합니다.

SST의 전압 요구 사항과 전력 클래스

SST 관련 전력 및 전압 수준도 높아지고 있습니다. 초기 구현은 일반적으로 약 1MW가 한계였습니다. 오늘날 중전압 그리드 연결 태양열 시스템 및 ESS(에너지 저장 시스템)의 전력 용량은 일반적으로 2MW~4MW 수준에서 시작하며 시스템에 따라 6MW에 달하는 경우도 있습니다. 따라서 새롭게 개발되는 SST는 2MW~6MW 범위의 전력 레벨을 지원해야 하며 이미 이 전력 클래스에 속하는 시스템을 발표한 제조업체도 여러 곳 있습니다.

그리드 전압 요구 사항도 동시에 변화하고 있습니다. 초창기 SST 설계는 주로 10kV 및 약 13.8kV의 중전압 그리드를 목표로 삼았지만 차세대에는 최대 35kV의 그리드 전압을 지원할 것으로 예상됩니다. 이렇게 전력 및 전압 레벨이 높아지면서 전력 밀도, 절연 및 고전압 절연에 대한 추가적인 요구 사항이 생깁니다. TI는 효율적인 그리드 연결 고전압 전력 시스템을 지원하도록 설계된 게이트 드라이브, 절연, 센싱 및 제어 기술을 통해 이러한 요구사항에 대응하고 있습니다.

SST 아키텍처 선택

초기 SST 설계는 주로 2레벨 H 브리지 컨버터를 사용했지만(그림 4 참조), 차세대 SST의 AC/DC 단계에서는 특히 ANPC(Active Neutral Point Clamped) 컨버터 위주로 멀티레벨 토폴로지가 점차 보편적으로 사용되고 있습니다. 이러한 토폴로지를 사용하면 최신 시스템의 높아진 전압 스트레스와 효율성 요구 사항이 해결됩니다.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

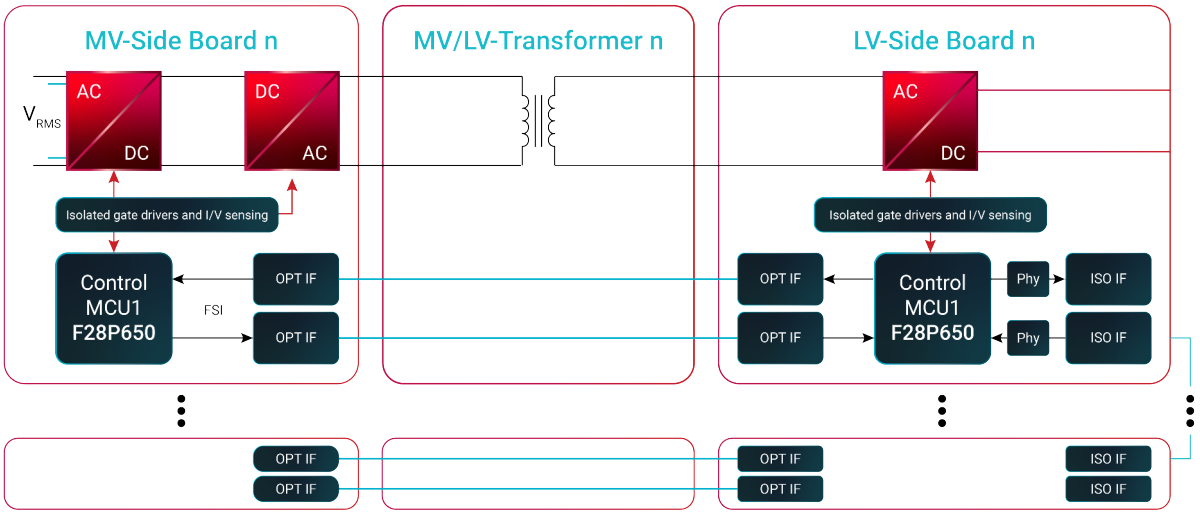


그림 4. AC/DC 및 절연 DC/DC를 지원하는 변환 셀 아키텍처

절연 DC/DC 단계에서는 일반적으로 위상 변이 DAB(듀얼 액티브 브리지) 컨버터와 공진 CLLLC DAB 컨버터 중 하나를 선택합니다. SST 내부에서는 DC/DC 컨버터 여러 개가 병렬로 연결되기 때문에 동기화를 간소화하기 위해 위상 변이 DAB와 같은 고정 주파수 토폴로지가 선호되는 경우가 많습니다. 반면 CLLLC DAB 아키텍처에서는 스위칭 주파수가 미세한 차이가 발생할 수 있어서 필터링하기 까다로운 가청 비트 주파수나 전기 간섭이 발생할 가능성이 있습니다.

TI에서는 다양한 애플리케이션 요구 사항에 대응하기 위해 다음과 같은 장치 기술을 제공합니다.

- 실시간 MCU(마이크로컨트롤러)는 2레벨 H 브리지 및 ANPC, NPC(Neutral Point Clamped), T형 및 플라잉 커패시터 컨버터 등 멀티레벨 토폴로지에 맞는 기존 변조 기법을 지원합니다.
- 2.3kV 및 3.3kV SiC 전력 모듈의 작동 전압 요구 사항에 부합하도록 특수 설계된 고전압 게이트 드라이버 및 절연이 제공됩니다.
- 절연 감지 솔루션으로 고전압, 고주파 환경에 최적화된 정밀한 전류 및 전압 감지를 제공합니다.

실시간 TI C2000™ MCU 등을 사용하여 제어 MCU의 접지를 DC 링크의 중간 지점에 연결하면 절연 장벽 전체에서 전압 스트레스를 낮출 수 있고 관련 작동 전압을 2kV 미만으로 유지할 수 있습니다.

SST 아키텍처가 더 높은 전력 레벨, 더 높은 그리드 전압 및 높은 전력 밀도와 더욱 통합된 제어를 지원하는 방향으로 발전하면서 전원 반도체를 뒷받침하는 기술의 중요성도 커지고 있습니다. 고전압 게이트 드라이버, 절연, 감지, 실시간 제어, 안정적인 시스템 통신 모두 차세대 SST 시스템을 실현하는 데 중요한 역할을 합니다.

극복해야 하는 설계별 문제점

설계자는 아키텍처 선택 말고도 SST 설계와 관련해 중요한 기술적 과제를 해결해야 합니다. 각 컨버터 셀 내부에서 AC/DC 단계와 절연 DC/DC 단계를 동기화해야 한다는 것입니다. 이러한 기능은 두 가지 서로 다른 전압 도메인에서 작동합니다. AC/DC 단계와 절연 DC/DC 컨버터의 1차측은 중전압 측에서 작동하고 절연 DC/DC 컨버터의 2차측은 저전압 측에서 작동합니다.

두 도메인 사이의 절연 장벽은 SST의 위상-중립 전압 전체를 견딜 수 있어야 합니다. 라인간 정격 전압이 35kV인 시스템에서는 이 전압이 약 20kV에 달할 수 있습니다. 이 요구 사항을 충족하려면 고주파 변압기가 중앙에 배치되어 있는 그림 5 에서 볼 수 있듯이 충분한 물리적 이격 거리와 적절한 간극 및 연면 거리를 확보해야 합니다. 중전압 PCB(인쇄 회로 보드)(그림 5A)와 저전압 PCB(그림 5B)에서는 절연 간극이 컨버터 모듈의 작동 전압을 준수해야 하며 이 전압은 신형 SST 시스템에서는 일반적으로 2kV를 넘지 않습니다.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

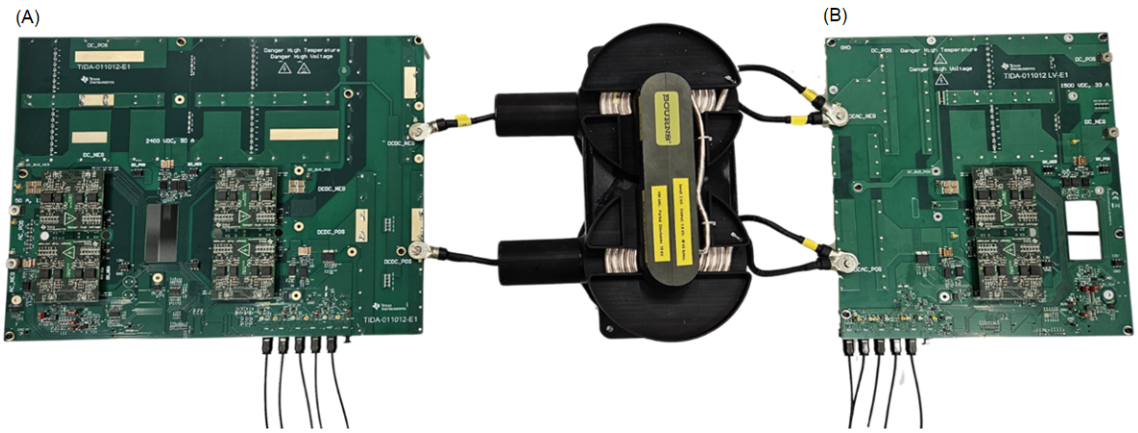


그림 5. 중전압(A) PCB와 저전압(B) PCB 사이에 플라스틱 광섬유 인터페이스가 있는 50kW SiC 기반 모듈식 SST

설계자는 광 링크나 무선 주파수 기술을 사용해 고전압 절연 장벽을 가로지르는 통신을 구현할 수 있습니다. 현재 광섬유 통신은 짧은 지연 시간, 높은 전자기 간섭 내성 및 뛰어난 절연 성능으로 인해 선호되는 방식입니다. 따라서 비용 효율성이 높은 고속 광 트랜시버는 전체 SST 시스템의 비용을 절감하는 데 중요한 역할을 할 것입니다.

또한 설계자는 중앙 컨트롤러와 각 위상 스택 내 개별 컨버터 셀 사이의 통신도 개발해야 합니다. 널리 사용되며 신뢰성이 높은 프로토콜을 기반으로 표준화된 통신 아키텍처를 구축하면 상호 운용성을 간소화하는 동시에 유럽연합의 사이버 복원력법과 같은 규제 체계를 비롯해 변화하는 사이버 보안 요구사항에도 더욱 쉽게 대응할 수 있습니다.

TI에서는 설계자가 출시 기간을 단축하는 데 도움이 되는 리소스 및 레퍼런스 설계를 제공합니다. 예를 들어 중전압 애플리케이션용 50kW SiC 기반 모듈식 솔리드 스테이트 변압기 레퍼런스 설계(앞의 그림 5 참조)를 출발점으로 삼으면 좋습니다.

SST를 도입하면 유익한 기타 애플리케이션

SST 개발은 특히 메가와트급 충전 인프라를 위주로 EV 충전 분야에서도 빠르게 진행되고 있습니다. 지금은 운영업체에서 이러한 시스템을 최고 690V_{AC}에서 작동하는 저전압 그리드에 연결해 기존의 저주파 변압기를 통해 중전압 그리드와 인터페이스하고 있습니다.

SST를 사용하면 중전압 그리드에 더 직접적으로 연결할 수 있고, 전력 발전과 EV 배터리 간 전력 변환 단계 수를 줄여서 에너지 효율을 개선할 수 있습니다. 이 아키텍처는 중대형 EV와 디스펜서가 여러 개인 충전소에 특히 유리합니다.

중전압 그리드에 연결한 ESS도 설득력 있는 또 다른 애플리케이션입니다. 태양광과 저장을 결합한 시설의 경우 중앙의 태양광 인버터를 DC 측의 ESS에 직접 연결하면 태양광 전력을 중앙 인버터에서 DC에서 AC로 변환한 다음 저장을 위해 다시 AC에서 DC로 변환할 필요가 없어집니다. 따라서 에너지 손실을 유발하는 두 단계의 변환 과정을 생략할 수 있습니다. SST를 통해 중전압 그리드에 연결된 DC 결합 태양광·에너지 저장 아키텍처를 구현하면 전체 전력 변환 체인이 간소해지고 변환 손실을 줄여 주며 시스템 효율이 개선됩니다.

SST는 이러한 애플리케이션에서 에너지 변환 및 전력 공급 양쪽에 더 간단하고 효율적인 아키텍처를 지원하고 있습니다.

작성자 소개

Harald Parzhuber는 텍사스 인스트루먼트의 재생 에너지 시스템 팀을 관리하고 있습니다. 설계 및 테스트 엔지니어링부터 제품 정의와 시스템 엔지니어링에 이르기까지 30년 이상의 엔지니어링 경력을 보유하고 있습니다. 또한 산업 자동화 분야에서 네 건의 특허를 보유하고 있습니다. Parzhuber는 독일 란츠후트의 응용과학대학교에서 전기공학 석사 학위를 받았습니다.

추가 리소스

- 50kW SST 설계 데모 비디오인 "AI 데이터 센터의 기존 변압기 대체"를 참조하십시오.

상표

C2000™은 텍사스 인스트루먼트의 상표입니다.

모든 상표는 각 소유권자의 자산입니다.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

중요 알림 및 고지 사항

TI는 기술 및 신뢰성 데이터(데이터시트 포함), 디자인 리소스(레퍼런스 디자인 포함), 애플리케이션 또는 기타 디자인 조언, 웹 도구, 안전 정보 및 기타 리소스를 "있는 그대로" 제공하며 상업성, 특정 목적 적합성 또는 제3자 지적 재산권 비침해에 대한 묵시적 보증을 포함하여(그러나 이에 국한되지 않음) 모든 명시적 또는 묵시적으로 모든 보증을 부인합니다.

이러한 리소스는 TI 제품을 사용하는 숙련된 개발자에게 적합합니다. (1) 애플리케이션에 대해 적절한 TI 제품을 선택하고, (2) 애플리케이션을 설계, 검증, 테스트하고, (3) 애플리케이션이 해당 표준 및 기타 안전, 보안 또는 기타 요구 사항을 충족하도록 보장하는 것은 전적으로 귀하의 책임입니다.

이러한 리소스는 예고 없이 변경될 수 있습니다. TI는 리소스에 설명된 TI 제품을 사용하는 애플리케이션의 개발에만 이러한 리소스를 사용할 수 있는 권한을 부여합니다. 이러한 리소스의 기타 복제 및 표시는 금지됩니다. 다른 모든 TI 지적 재산권 또는 타사 지적 재산권에 대한 라이선스가 부여되지 않습니다. TI는 이러한 리소스의 사용으로 인해 발생하는 모든 청구, 손해, 비용, 손실 및 책임에 대해 책임을 지지 않으며 귀하는 TI와 그 대리인을 완전히 면책해야 합니다.

TI의 제품은 TI의 판매 약관 , TI의 일반 품질 지침또는 ti.com 이나 해당 TI 제품과 함께 제공되는 기타 조건의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다. TI가 명시적으로 제품을 사용자 정의 또는 고객 정의용으로 지정하지 않는 한, TI 제품은 범용의 표준 카탈로그 장치입니다.

TI는 사용자가 제안할 수 있는 어떠한 추가적이거나 상이한 조건도 반대하며 이를 거부합니다.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

최종 업데이트: 2025/10/25

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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, TI’s General Quality Guidelines, or other applicable terms available either on 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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025