

## Technical Article

# LLC 토폴로지를 이용해 자동차 설계자가 전력 밀도와 안정성을 강화하도록 지원



Andrew Plummer



차량용 전원 설계자는 국제표준화 기구 26262 에서 정의한 차량용 안전 무결성 수준 표준에 부합하는 토폴로지와 컨트롤러를 선택하고, 폼 팩터와 효율성과 같은 사양도 충족해야 합니다. 기존에 설계자는 하프 브리지 토폴로지로 구성된 단순한 아날로그 PWM(펄스 폭 변조) 컨트롤러를 사용했습니다. 하지만 고급 보호나 더 높은 효율성이 필요한 시스템의 경우 PWM 컨트롤러만으로는 충분하지 않을 수 있습니다.

최신 하이브리드 차량이나 EV(전기차)는 주행 거리와 안전성을 극대화하기 위해 더 높은 전력 밀도, 가벼운 부하 성능, 더 우수한 안정성을 필요로 하므로 설계자가 보조, 중복, 분산형 및 영역 모듈과 같은 새로운 파워트레인 시스템 아키텍처를 모색하게 되었습니다. 모터사이클, 골프 카트, 지게차는 물론 잔디 깎는 기계의 제조사들도 배출 가스를 줄이기 위해 전압이 더 높은 배터리 팩, 전기화된 기종, 충전 인프라에 투자하고 있습니다. LEV(경량 전기차) 설계자에게는 비용이나 안정성을 희생하지 않고도 높은 전력 밀도를 제공하는 제품이 필요합니다.

LLC(인덕터-인덕터-커패시터) 토폴로지는 고유한 공진과 ZVS(제로 전압 스위칭) 덕분에 PWM 컨트롤러 기반 하프 브리지 컨버터에 비해 더 높은 효율성과 더 우수한 EMC(전자기 호환성)를 제공합니다. 하지만 LLC 토폴로지가 제공하는 장점(최소 대기 전력, 낮은 가청 소음 등)에도 불구하고, EV 제조업체에서는 작동 입력 전압 범위의 한계 때문에 LLC 토폴로지 사용을 주저해 왔습니다. 차량용 DC/DC 컨버터는 콜드 크랭크, 과도 현상 또는 충돌 관련 상황에서도 성능을 유지하기 위해 넓은 범위의 입력 전압, 출력 전압 지원, 또는 두 가지 모두가 필요합니다.

UCC25661(Q1)과 같은 LLC 컨트롤러 부분의 기술 혁신 덕분에 차량용 및 EV 충전 애플리케이션에서 새로운 LLC 토폴로지 사용 사례가 실현되고 있습니다. EV의 경우, LLC 토폴로지를 중복, 보조, 영역 모듈 또는 키 오프 전원 공급 장치에 사용할 수 있습니다. LEV의 경우, LLC 토폴로지를 온보드 DC/DC 컨버터 또는 오프보드 충전기/어댑터에 사용할 수 있습니다. 이러한 각 애플리케이션에서는 차량 주행 거리를 극대화하고 비용을 절약하기 위해 높은 효율성과 최소한의 크기를 실현해야 합니다. 특히 차량 전체에 여러 LLC 컨버터가 분산된 경우 이 점이 매우 중요합니다(그림 1의 영역 모듈 참조).

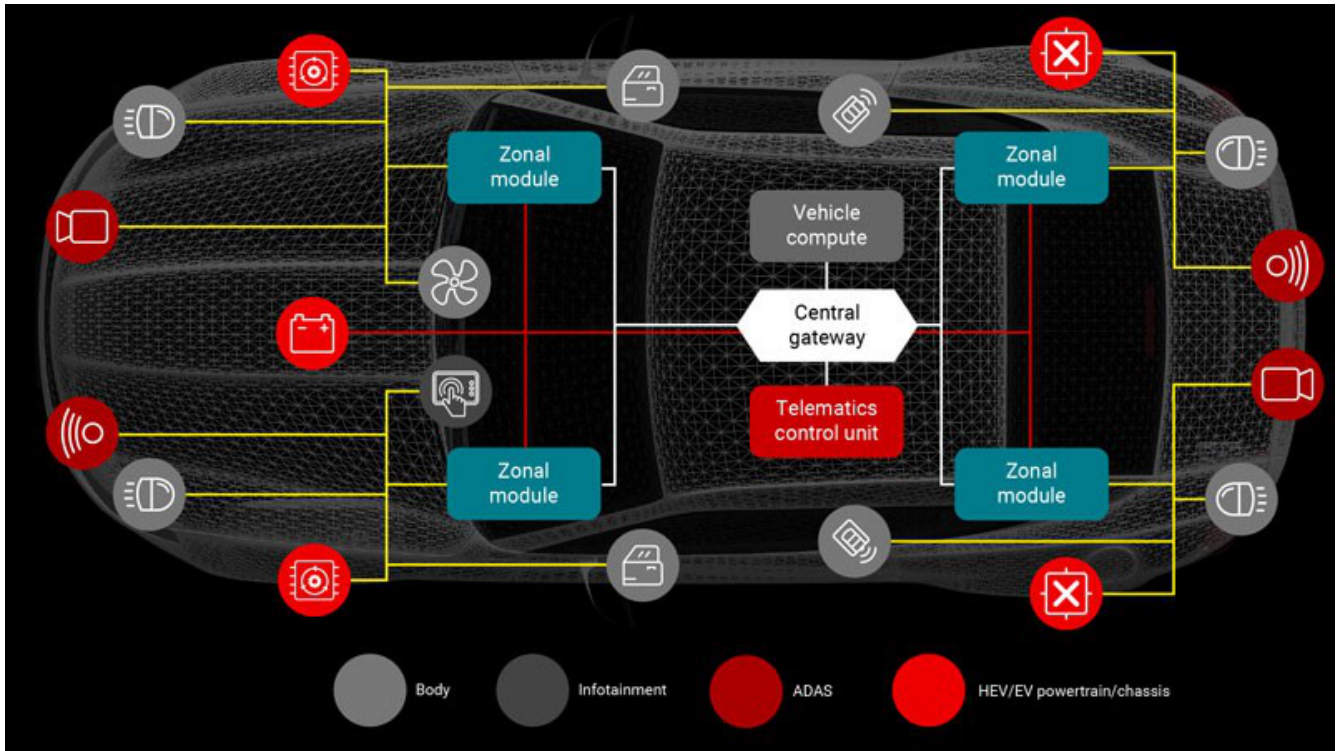


그림 1. 영역 아키텍처

### LLC 토폴로지를 사용하여 차량용 시스템의 전력 밀도 향상

자기 부품은 일반적으로 절연 전원 공급 장치의 크기와 무게를 좌우합니다. 크기는 스위칭 주파수와 반비례합니다. 이는 고정 출력 전원에서 스위칭 사이클당 저장하거나 제공해야 하는 에너지가 더 적기 때문입니다.

UCC25661-Q1 LLC 컨트롤러는 공진 주파수가 750kHz라서 자기 부품의 크기와 무게를 둘 다 줄이는 데 도움이 되고, 따라서 비용을 절감하고 안정성을 강화하는 효과가 있습니다. 차량 한 대 전체에 LLC 컨버터를 여러 개 분산하면 더 작고 가벼운 자기 부품을 사용하는 데서 오는 장점이 더욱 커집니다.

PWM 컨트롤러는 고주파수 작동을 지원할 수 있지만, 하드 스위칭으로 인해 부피가 큰 EMI 필터 없이 CISPR(Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) 25에 지정된 것과 같은 EMI 한도를 준수하기는 어려울 수 있습니다. LLC 컨트롤러는 전력계에 공진 탱크가 있기 때문에 본질적으로 소프트 스위칭입니다. 따라서 LLC 토폴로지가 하드 스위칭 하프 브리지 토폴로지보다 전도성 EMI와 스위칭 손실을 적게 생성합니다.

그림 2에 하드 스위칭과 소프트 스위칭(ZVS)의 차이를 표시했습니다.

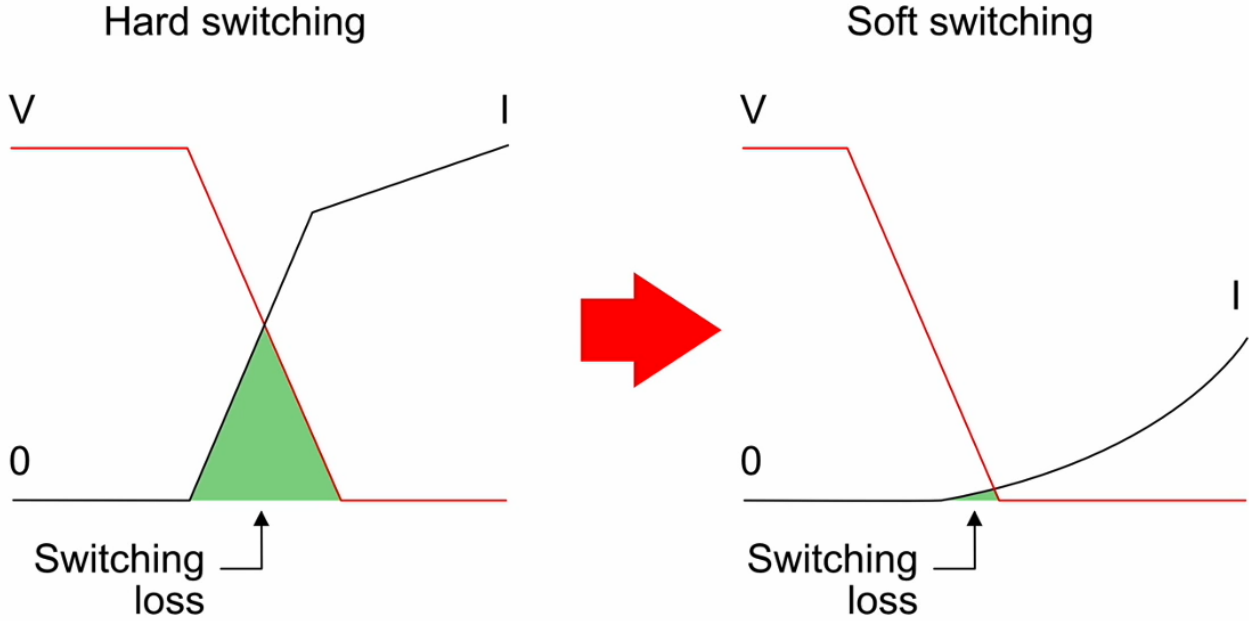


그림 2. 하프 브리지 PWM 컨트롤러와 LLC 컨트롤러의 스위칭 이벤트 파형 예시

### IPPC를 사용한 새로운 사용 사례

UCC25661-Q1 LLC 컨트롤러에는 TI의 IPPC(Input Power Proportional Control)가 내장되어 있어 배터리 충전과 같이 출력 전압 범위가 넓은 애플리케이션(경량 EV 어댑터, 충전소 또는 보조 공급 장치 등)을 지원합니다. IPPC는 또한 EV의 배터리 구동 DC/DC 시스템에서 넓은 입력 전압 범위를 지원합니다. LEV는 주행 거리를 극대화하기 위해 12V~36V의 낮은 전압 배터리 팩에서 48V, 심지어 96V를 넘는 고전압으로 전환하고 있습니다.

넓은 출력 전압 범위를 지원하면 설계자가 배터리 전압이 낮을 때 LLC 컨버터가 버스트 모드에 진입하지 않도록 설계해 배터리 수명을 보호할 수 있습니다. 또한 IPPC는 버스트 모드 성능 안정성을 조정할 때 개발 시간을 단축해 줍니다. UCC25661-Q1의 IPPC는 컨트롤러가 전력을 제공하기 위해 사용하는 스위칭 주파수를 크게 줄여 기존 LLC 제어 법칙의 한도를 뛰어넘습니다. 이처럼 제한을 없애므로써 엔지니어는 차량 안팎의 배터리 애플리케이션에서 원치 않는 과부하 보호를 피할 수 있습니다.

또한 IPPC는 역률 보정이 비활성화되었을 때 과부하 전력 한도를 트리거하지 않고 더 효율적으로 전력을 제공하는 데 도움을 줍니다. 혼합 버스트 모드는 가청 잡음을 최소화할 뿐 아니라 경부하 및 무부하 성능도 향상해 배터리 방전을 방지하는 데 중요한 역할을 합니다.

UCC25661-Q1에는 프리바이어스 시동, 소프트 스타트, 정전식 영역 회피와 같은 강력한 보호 기능이 있어 고도로 안정적인 전원 공급 장치를 설계할 수 있습니다.

### 통합 기능으로 전원 공급 장치 설계를 간소화하고 보호

UCC25661-Q1에는 자체 적응형 소프트 스타트 기능이 있어 공급 전압을 안정화하고 천천히 상승시키므로, VDD 핀에 연결된 커패시터가 시동 전에 완전히 충전되어 전원 공급 장치를 과도한 돌입 전류로부터 보호합니다.

부하 조건에 따라, LLC 컨트롤러를 사용하는 전력 컨버터는 정전식 영역이나 공진 영역에서 작동할 수 있습니다. 정전식 영역에서 작동하면 전력계에 엄청난 손상을 유발할 수 있습니다. 대부분의 LLC 컨트롤러는 정전식 영역 작동을 감지한 후에야 작동을 중지하지만, UCC25661-Q1은 정전식 영역 회피 기능을 통해 게이트 드라이브를 미리 종료함으로써 손상을 예방합니다.

## 결론

EV는 차세대 아키텍처를 가능하게 하는 DC/DC 컨버터를 정의하기 위해 LLC 토폴로지와 같은 절연 전원 공급 장치 토폴로지 및 IPPC와 같은 제어 방법론의 발전에 의존합니다. UCC25661-Q1 LLC 컨트롤러 기반의 절연 DC/DC 컨버터를 사용하면 폼 팩터 크기는 같거나 더 작은데도 더 효율적으로 전력을 제공하면서 성능까지 유지할 수 있습니다.

## 추가 리소스

- 애플리케이션 노트 읽기:
  - [경부하 효율성에 최적화된 UCC25661x-Q1 제품군 750kHz 넓은 VIN/VOOUT 범위 LLC 컨트롤러 데이터 시트](#).
  - [UCC25661x 선택 가이드](#).
- 다음 레퍼런스 설계를 확인해 보십시오.
  - [범용 입력, 500W 정전류 및 정전압 전기 자전거 충전기 레퍼런스 설계](#).
  - [경량 전기 2륜차용 750W 오프보드 충전기 레퍼런스 설계](#).

## 상표

모든 상표는 각 소유권자의 자산입니다.

## 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 침해에 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, 규정 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 [ti.com](https://www.ti.com)에서 확인하거나 이러한 TI 제품과 함께 제공되는 [TI의 판매 약관](#) 또는 기타 해당 약관의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다.

TI는 사용자가 제안했을 수 있는 추가 또는 기타 조건을 반대하거나 거부합니다.

주소: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

## 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 © 2025, Texas Instruments Incorporated