

Technical Article

LLC 공진 컨버터로 넓은 작동 범위를 달성하기 위한 팁과 요령



Benjamin Lough

LLC(인덕터-인덕터-커패시터) 공진 컨버터는 절연 DC/DC 컨버터가 필요한 애플리케이션을 위한 몇 가지 매력적인 특성이 있습니다. 이러한 특성에는 최소한의 스위칭 손실, 공진 주파수 미만에서 작동할 때 역복귀 없음, 변압기 내에서 큰 누설 인덕턴스를 견딜 수 있는 기능 등이 있습니다.

과제

넓은 작동 범위를 가진 LLC 컨버터를 설계할 때의 주요 과제는 등가 부하 저항에 대한 게인 곡선의 동작입니다. 이는 품질 계수(Q_e)가 증가할수록 획득 가능한 최대 게인이 반대로 감소하고, Q_e 가 감소할수록 획득 가능한 최소 게인이 증가하기 때문에 발생합니다. 이를 아래 그림 1에서 볼 수 있습니다.

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r C_r}}{R_e} \quad (1)$$

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (2)$$

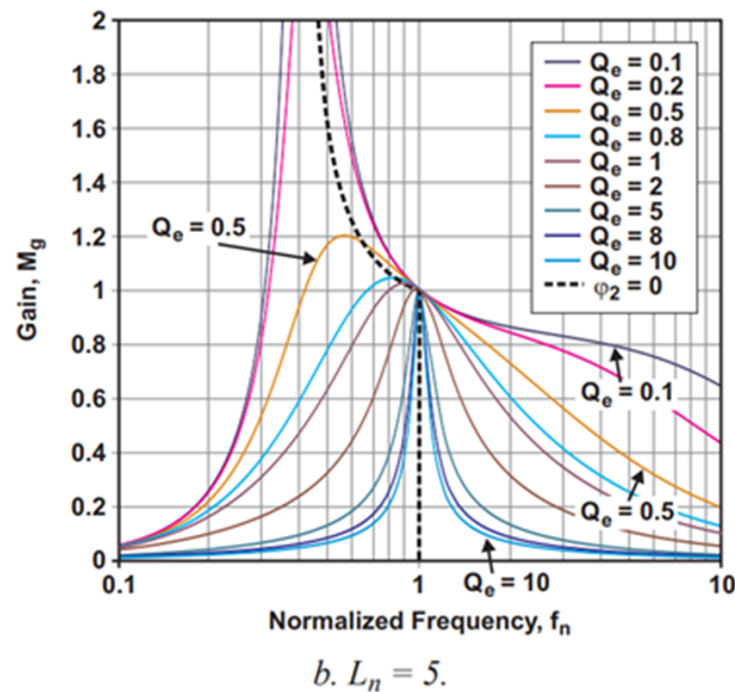


그림 1. Q_e 가 증가할수록 획득 가능한 최대 게인이 감소함을 보여주는 LLC 게인 곡선. 출처: 텍사스 인스트루먼트

이 동작으로 인해 전력계에서 합리적인 RMS(제곱 평균 제곱근) 전류를 유지하고 합리적인 스위칭 주파수 범위를 유지하기 어렵습니다. 필요한 주파수 범위를 줄이기 위해 인덕턴스 비율(L_n)을 줄여야 하지만, 인덕턴스 비율이 낮을수록 전력계의 자화 전류가 증가합니다. 이 문서에서는 넓은 작동 범위를 가진 LLC 컨버터를 설계하는 5가지 팁에 대해 설명합니다.

재구성 가능한 정류기 사용

LLC 컨버터의 작동 범위를 늘리는 방법 중 하나는 [그림 2](#)에 나와 있는 것처럼 재구성 가능한 정류기를 구현하는 것입니다.

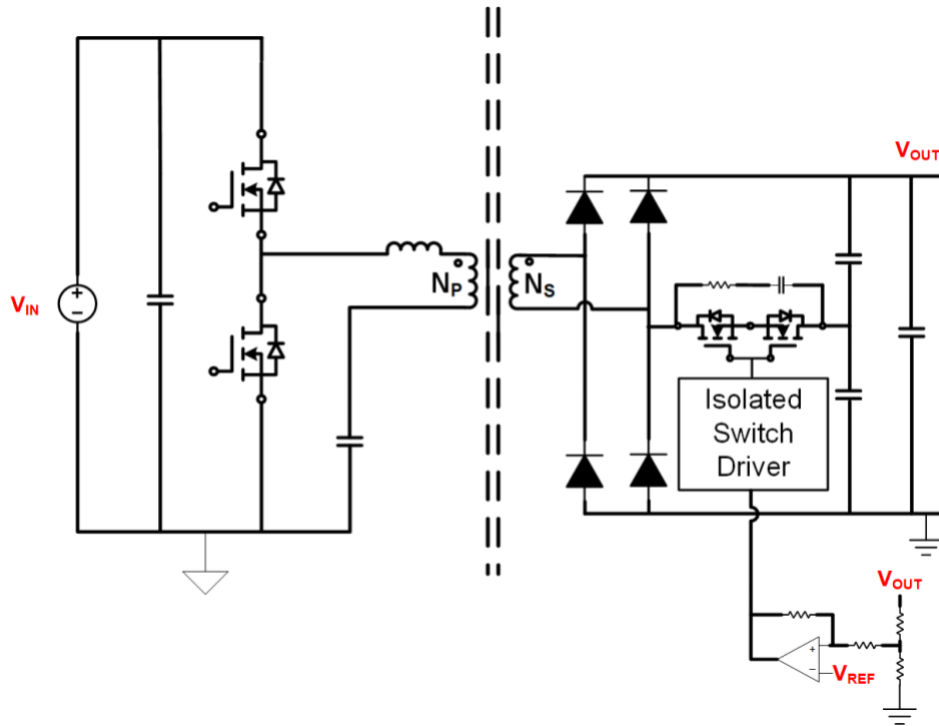


그림 2. 풀 브리지 또는 전압 더블러로 재구성할 수 있는 재구성 가능한 정류기가 있는 LLC 컨버터. 출처: 텍사스 인스트루먼트

이 구조에서 비교기를 사용하여 출력 전압을 보고 작동 모드를 결정하는 방법으로 정류기를 풀 브리지 또는 전압 더블러 정류기로 구성할 수 있습니다. 풀 브리지 정류기로 작동할 경우 방정식 3으로 입력-출력 전송 기능을 계산합니다.

$$V_{out} = M_g(f_{sw}) \times \frac{1}{n} \times \frac{V_{in}}{2} \quad (3)$$

전압 더블러 정류기로 작동할 경우 입력-출력 전송 기능은 다음과 같습니다.

$$V_{out} = 2 \times M_g(f_{sw}) \times \frac{1}{n} \times \frac{V_{in}}{2} \quad (4)$$

[그림 3](#)은(는) 위의 접근 방식을 사용하여 고정 450V 입력에서 140V~420V 출력 전압 범위를 달성하는 LLC의 스위칭 주파수 대 출력 전압을 보여줍니다. 이 데이터는 출력의 800mA 부하로 수집된 것입니다. 비교기가 풀 브리지에서 전압 더블러 모드로 전환하는 200V의 점프에 주목하십시오.

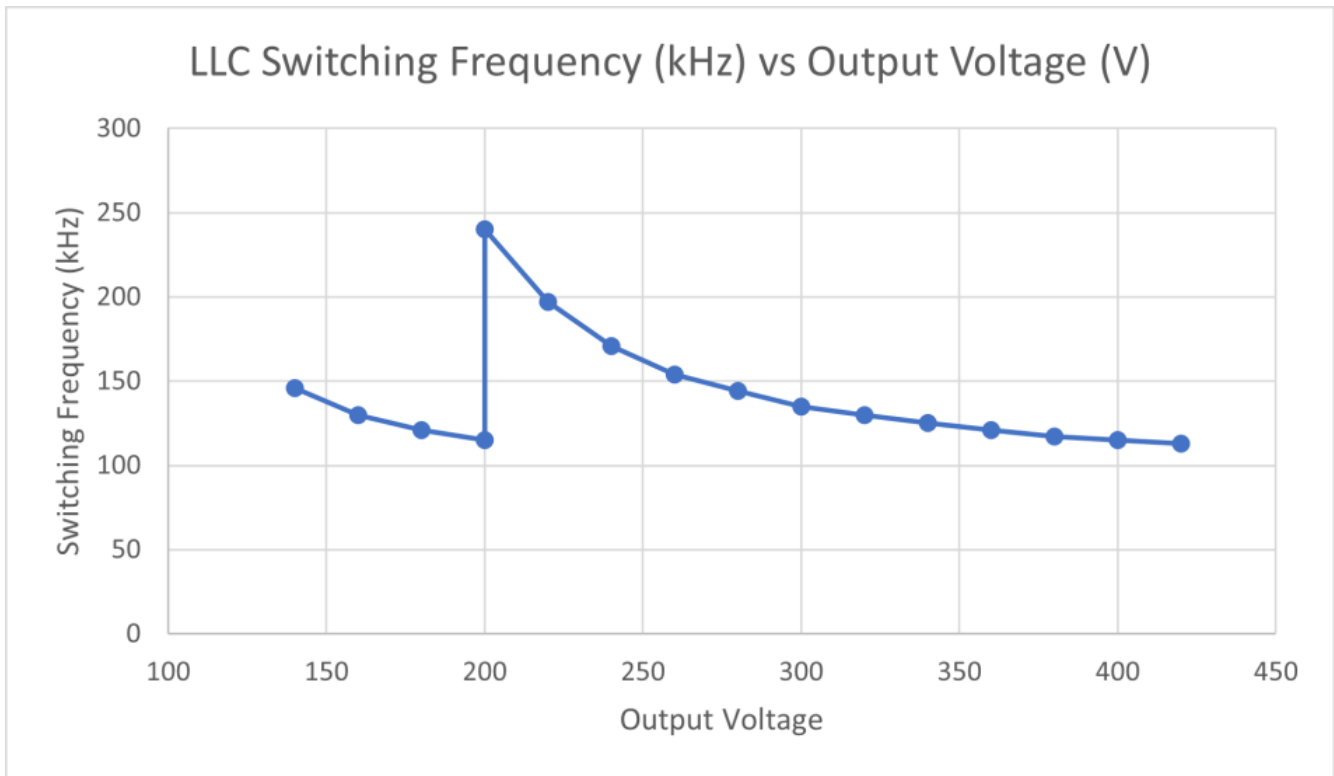


그림 3. LED 드라이버의 스위칭 주파수 대 출력 전압 레퍼런스 설계. 출처: 텍사스 인스트루먼트

권선 및 정류기 커패시턴스 최소화

작동 지점이 최소 게인 곡선 아래로 떨어지면 LLC 컨트롤러는 출력 전압을 조정 상태로 유지하기 위해 버스트 모드로 작동해야 합니다. 버스트 모드는 저주파 출력 리플 전압이 높습니다. 이는 낮은 부하와 최소 출력 전압에서 매우 낮은 출력 리플을 필요로 하는 애플리케이션에서 문제가 됩니다.

이러한 경우 변압기 내의 권선 커패시턴스와 정류기의 출력 커패시턴스(C_{oss}) 또는 접합부 커패시턴스(C_j)를 최소화해야 합니다. 이러한 기생 커패시턴스로 인해 공진 주파수 이상으로 작동할 때 게인 곡선이 반전됩니다. 그림 4은(는) 낮은 부하에서 LLC 게인의 전통적인 FHA(첫 번째 고조파 근사치) 계산 결과를 보여줍니다. 또한 전력계에 사용되는 권선 커패시턴스와 정류기의 C_{oss} 를 고려했을 때의 동일한 LLC 게인 곡선도 보여줍니다.

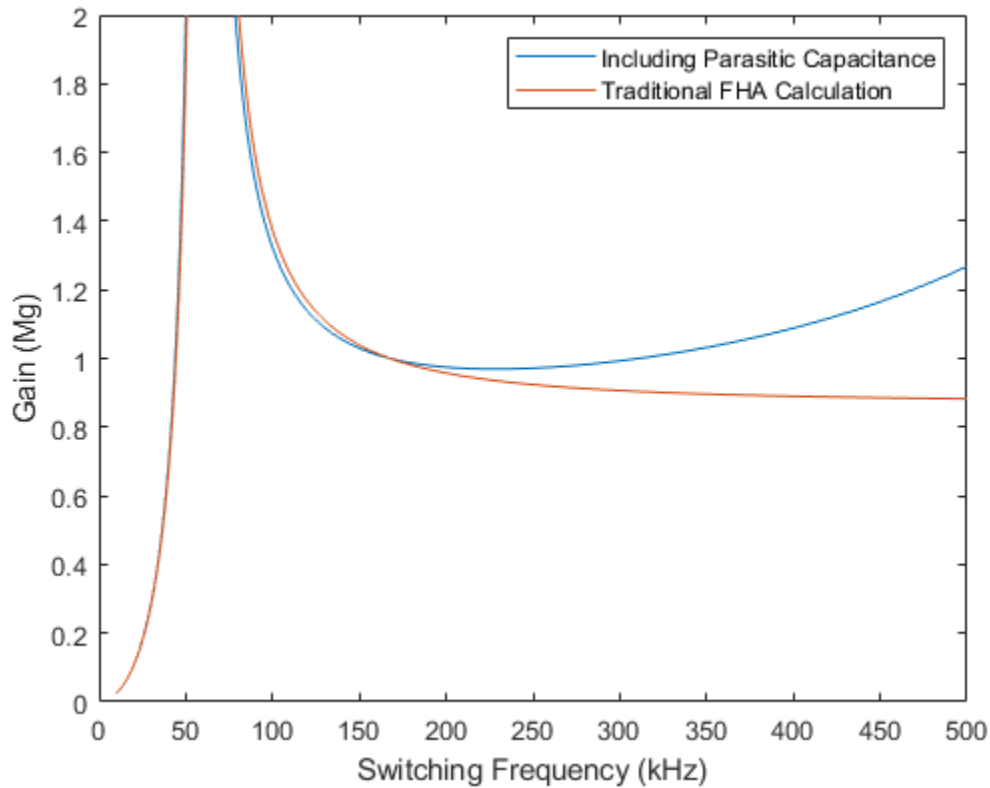


그림 4. 낮은 부하에서 기생 커패시턴스가 LLC 게인 곡선에 미치는 영향. 출처: 텍사스 인스트루먼트

변압기 내 권선 스택업에 주의하여 정류기 부품을 선택하면 이 게인 곡선 반전 효과가 최소화됩니다. SiC 다이오드 또는 GaN HEMT(고전자 모빌리티 트랜지스터)와 같은 넓은 밴드갭 장치를 정류기로 사용하면 Si MOSFET 또는 다이오드에 비해 C_{oss} 가 상당히 낮아질 수 있습니다.

고주파 스킵 모드가 있는 LLC 컨트롤러 사용

고주파 스킵 모드를 사용하면 정상 스위칭으로 달성할 수 있는 것에 비해 더 낮은 게인을 달성할 수 있습니다. 아래는 입력 범위가 70V~450V인 100W 하프 브리지 LLC 컨버터의 예를 보여줍니다. 그림 5에서 공진 전류는 녹색으로 표시되어 있고, 1차 측 스위치 노드는 파란색으로 표시되어 있습니다.

오른쪽을 보면 LLC 컨버터가 고주파 스킵 모드로 작동하여 네 번째 스위칭 사이클마다 생략합니다. 스위칭 주파수는 260kHz이지만 77kHz 버스트 주파수로 하위 변조됩니다.

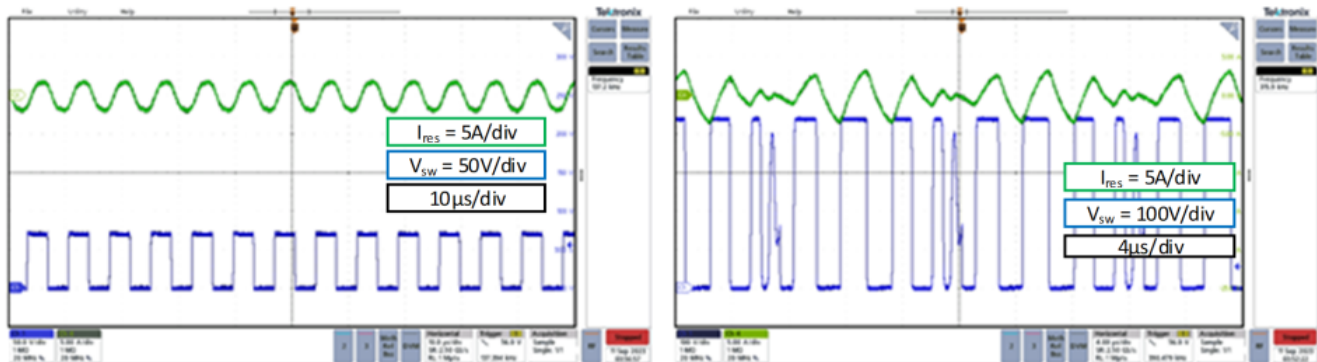


그림 5. 100W LLC 컨버터의 스위칭 동작. 녹색은 공진 전류를, 파란색은 1차 측 스위치 노드를 나타내며, 각각 70V 및 450V 입력에서의 동작에 해당. 출처: 텍사스 인스트루먼트

보조 바이어스 전압 관리

전원 공급 장치의 1차 및 2차 측에 필요한 바이어스 전압을 생성하는 작업은 LLC 변압기의 보조 권선을 포함하는 방식으로 수행할 수 있습니다. 가변 출력 전압을 사용하는 LLC 컨버터의 경우 출력 전압이 변함에 따라 보조 권선 전압이 변경됩니다. 이는 보조 권선과 2차 권선의 커플링이 좋지 않은 섹션형 보빈을 사용하는 LLC 변압기의 경우 특히 그렇습니다. 바이어스 전압을 조정하기 위해 간단한 LDO(저손실 레귤레이터) 구조를 사용하면 출력 전압이 증가함에 따라 효율성이 떨어지게 됩니다. 전력 손실을 처리하기 위해 더 큰 물리적 패키지가 필요할 수 있습니다.

그림 6에서 N_{aux1} 및 N_{aux2} 는 최저 출력 전압 또는 VCC 바이어스 전압에서 D1, Q1 및 D4를 통해 제공되도록 크기가 조정됩니다. 출력 전압이 증가하면 C2의 전압은 Zener D3의 항복 전압에서 Q1의 게이트 소스 임계값 전압을 뺀 값으로 제한됩니다. 출력 전압이 더 증가하면 N_{aux2} 에 의해 생성되는 전압이 VCC를 공급할 수 있을 만큼 충분히 높아지고, 게이트 소스 전압이 턴오프 임계값 아래로 감소하면 Q1이 강제로 꺼집니다.

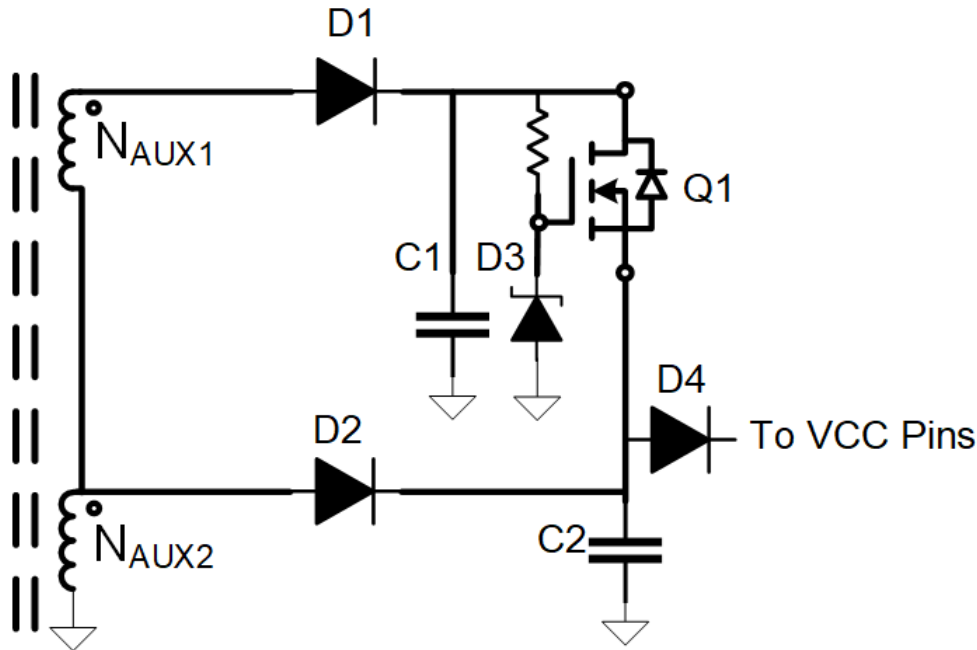


그림 6. 보조 권선을 LDO 구조와 함께 사용하여 전원 공급 장치의 1차 및 2차 측에 필요한 바이어스 전압 생성. 출처: 텍사스 인스트루먼트

이 접근 방식은 단일 권선 + LDO보다 더 효율적이지만 두 개의 보조 권선이 필요합니다. 하나의 보조 권선만 필요한 또 다른 방식은 LDO 대신 벅 컨버터나 부스트 컨버터를 사용하는 것입니다.

완전히 방전된 배터리를 위한 세류 충전 관리

배터리 충전기로 사용되는 LLC 컨버터는 완전히 방전된 배터리를 안전하게 복구해야 합니다. 이를 위해 배터리 팩 전압이 전체 충전 전류를 안전하게 받을 수 있을 정도로 높아질 때까지 작은 충전 전류를 가합니다. LLC는 작은 출력 전류로 0V 출력까지 조절할 수 없으므로 이 요구 사항을 맞추기 어렵습니다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 바이패스 FET가 병렬로 있는 소형 정전류 회로를 포함하여 이를 해결할 수 있습니다. 세류 충전 모드에서는 바이패스 FET가 꺼지고 출력 전류를 조정하도록 구성된 LM317이 출력 전류를 공급합니다. 이렇게 하면 출력 전압이 0V이더라도 LLC 컨버터의 최소 출력 전압이 0V보다 클 수 있습니다. 이 방식을 통해 LLC 변압기가 1차 측과 2차 측에 필요한 바이어스 전압을 생성할 수 있으며, 출력 전압이 0V일 때 별도의 바이어스 전원이 필요하지 않게 됩니다. 배터리 팩 전압이 충분히 높은 수준으로 상승하면 개별 충전 펌프 회로가 있는 FET는 정전류 회로를 우회합니다.

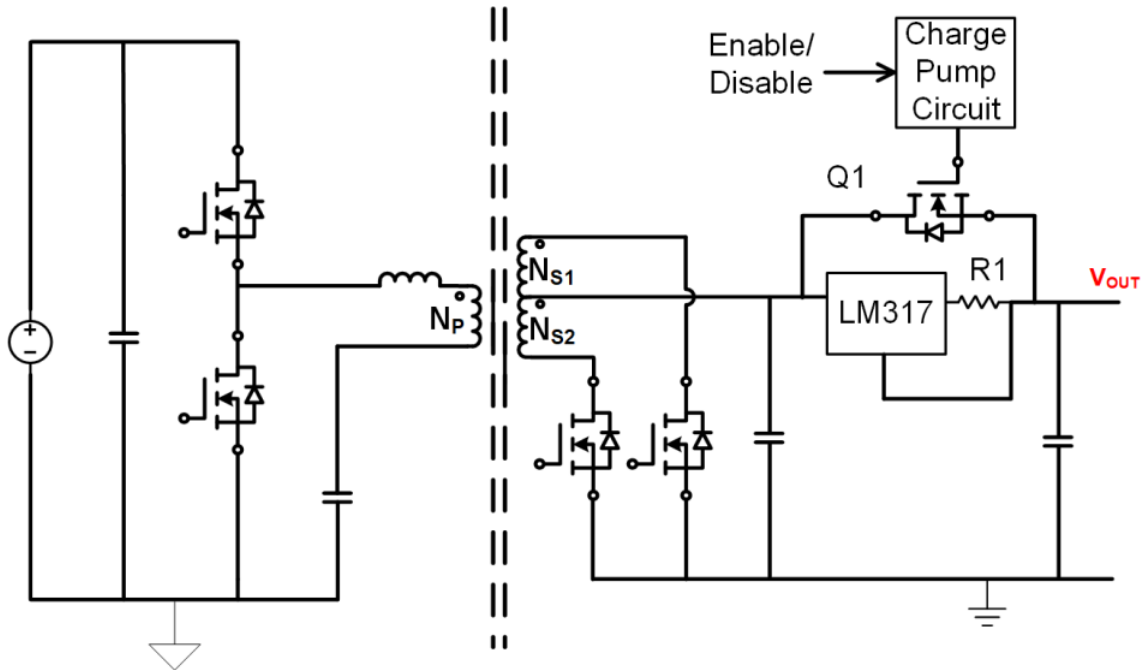


그림 7. 완전히 방전된 배터리를 안전하게 복구할 수 있는 세류 충전 회로를 사용하는 LLC. 출처: 텍사스 인스트루먼트

넓은 LLC 작동 범위

LLC 컨버터로 넓은 작동 범위를 달성하는 것은 LLC 토폴로지의 특성상 어려울 수 있지만, 넓은 작동 범위를 더 쉽게 달성하기 위한 여러 전략이 존재합니다. 여기에 나열된 5가지 간단한 팁과 요령은 아날로그 제어 방식이며 더 복잡한 디지털 제어 구현이 필요하지 않습니다.

관련 콘텐츠

- 전원 팁 #117: 전체 작동 조건에서 테스트하기 전에 LLC 공진 탱크 측정
- 파워 팁 #137: 디지털 컨트롤러를 사용하여 2차 측에서 LLC 전류 모드 제어 구현
- 파워 팁 #84: LLC 시리즈 공진 컨버터 박스에서 벗어나 생각하기
- 파워 팁 #103: 오디오 증폭기를 위한 LLC 설계 고려 사항

이전에 EDN.com에 게시되었습니다.

상표

모든 상표는 해당 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 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, 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