

Technical Article

고주파 공진 컨버터 설계 고려 사항, 1부



Sheng-Yang Yu

고주파 공진 컨버터 설계 고려 사항에는 부품 선택, 기생 매개 변수를 사용한 설계, 동기 정류기 설계 및 전압 게인 설계가 포함됩니다. 이 전원 팁에서는 스위칭 부품 선택에 영향을 미치는 주요 매개 변수와 고주파 공진 컨버터에서 변압기 권선 내 커패시턴스의 영향에 대해 중점적으로 다룹니다.

지난 10년 동안 WBG(넓은 밴드갭) 장치가 상용화되어 더 높은 전력 밀도를 위해 훨씬 더 높은 주파수에서 전력 컨버터를 작동할 수 있게 되었습니다. 고성능 전원 공급 장치에는 특히 실리콘 카바이드 및 질화 갈륨 FET(전계 효과 트랜지스터)와 같은 WBG 장치가 이제 막 포함되기 시작했습니다. 이는 이 장치들이 가진 출력 커패시턴스(C_{oss}), 게이트 전하(Q_g), 온 저항($R_{DS(on)}$) 및 역복귀 전하(Q_{rr}) 특성 때문이며, 모두 동일한 항복 전압 수준에서 실리콘 또는 실리콘 초접합 FET보다 수치가 더 낮거나 존재하지 않습니다. Q_g 가 더 낮아 필요한 구동 전력이 감소하며($P_{drive} = V_{drive} Q_g F_{sw}$), $R_{DS(on)}$ 이 더 낮아 전도 손실이 줄어듭니다. 여기서 V_{drive} 는 구동 전압이고 F_{sw} 는 FET 스위칭 주파수입니다. Q_g 및 $R_{DS(on)}$ 뿐만 아니라 고주파 컨버터를 선택할 때는 C_{oss} 및 Q_{rr} 를 고려하는 것도 중요합니다.

그림 1에 표시된 LLC-SRC(인덕터-인덕터-커패시터 직렬 공진 컨버터) 등의 공진 컨버터에서는 ZVS(제로 전압 스위칭)를 달성하기 위해 공진 탱크의 전류가 FET(그림 2의 상태 1)의 C_{oss} 를 충전/방전합니다. ZVS는 게이트 전압이 하이로 상승하기 전에 FET 드레인-소스 전압(V_{DS})이 제로에 도달하는 것을 말합니다. 따라서 C_{oss} 가 더 낮으면 동일한 공진 탱크 전류 수준에서 ZVS 도달을 위한 데드 타임이 더 짧아집니다. 데드 타임이 짧으면 듀티 사이클이 더 크고 1차측 공진 탱크 및 FET의 RMS(평균 제곱근) 전류가 더 낮습니다. 즉, 효율이 더 높고 더 높은 스위칭 주파수에서 컨버터를 작동할 수 있습니다.

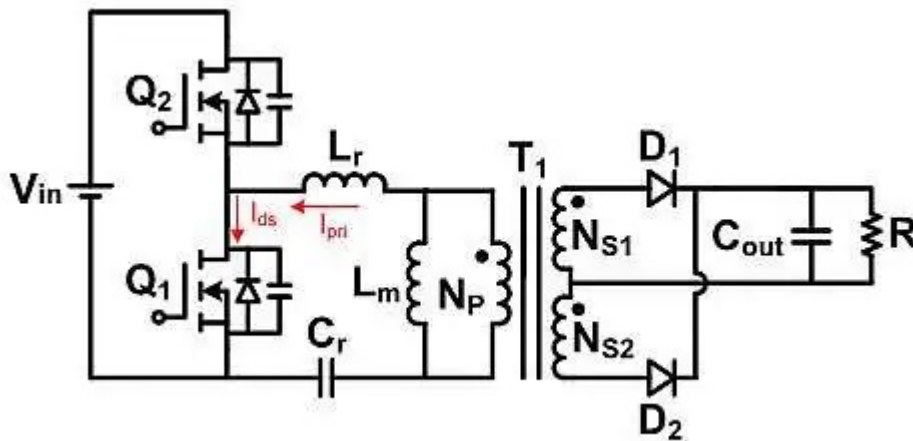


그림 1. LLC-SRC

ZVS를 달성하기 위해 FET의 바디 다이오드가 전류를 전도하는 기간이 항상 있으며, 그림 2에 표시된 상태 2에 해당합니다. FET에 Q_{rr} 이 있고 바디 다이오드가 계속해서 전류를 전도할 때 다시 켜지는 경우 FET 자체에서 역방향 전류를 생성하여 Q_{rr} 을 방전하고 하드 스위칭 및 고전압 응력을 유발함으로써 FET가 손상될 가능성이 있습니다.

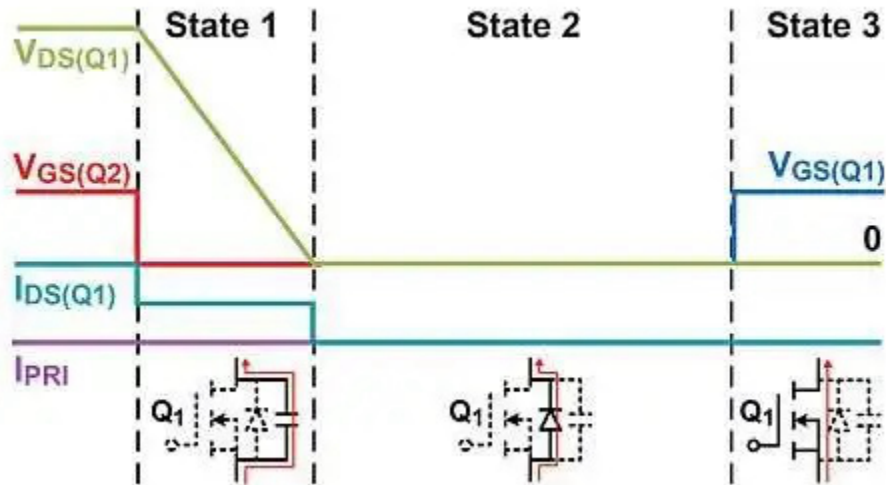


그림 2. LLC-SRC의 스위칭 전환

그림 3에서는 그림 1에 표시된 것처럼 LLC-SRC의 시동 프로세스 동안 발생하는 이러한 하드 스위칭 현상을 보여줍니다. FET Q₂가 먼저 전류를 전도하고 인덕터 전류 I_{PR1}가 형성됩니다. 그런 다음, 전류 I_{PR1}가 FET Q₁ 채널 및 바디 다이오드를 통해 전도됩니다. 전류가 역방향으로 흐르지 않도록 하면서 FET Q₂가 다시 켜집니다. Q_{rr}의 영향으로 인해 FET Q₁이 역방향 전류를 자체적으로 생성하여 Q_{rr}를 방전시킵니다. 이로 인해 고전압 응력이 발생합니다.



그림 3. Q_{rr}으로 인한 하드 스위칭

고주파 공진 컨버터에서는 공진 탱크 임피던스가 일반적으로 저주파 공진 컨버터보다 훨씬 더 낮습니다. 따라서 고주파 공진 컨버터의 시동 돌입 전류가 더 높을 것으로 예상됩니다. 그림 1의 LLC-SRC를 예로 사용하면, 출력 전압이 제로(시동 시 초기 상태)인 경우 Q₂가 먼저 전도되는 시동 전류를 제한하는 유일한 임피던스는 L_r(LLC-SRC의 직렬 공진 인덕터)입니다. 특히 버스 컨버터와 같은 고효율 및 고주파 공진 컨버터 설계에서는 효율을 높이기 위해 일반적으로 L_r을 최소화합니다. L_r 값이 작으면 동일한 시동 주파수에서 시동 전류가 더 높아지므로 Q_{rr} 관련 하드 스위칭에 더 취약해집니다. 따라서 고주파 공진 컨버터에서는 낮은 Q_{rr} FET를 사용하는 것이 필수적입니다.

앞서 언급한 WBG 장치의 장점을 활용하면 메가헤르츠 범위에서 절연 공진 컨버터를 작동할 수 있으며, 이는 기존 절연 전원 공급 장치보다 5~10배 더 빠릅니다. 이 "더 높은 주파수" 영역에서는 이전에는 컨버터 설계 프로세스에서 "무시할 수 있는" 수준으로 간주되던 많은 매개 변수를 더 이상 무시할 수 없습니다(예: 변압기 권선 내 커패시터).

기존 공진 컨버터 설계 프로세스에서 설계자는 ZVS를 달성하기 위해 C_{oss} 가 공진 탱크에 저장된 에너지를 전부 소모할 수 있도록 공진 탱크에 저장된 에너지가 FET C_{oss} 에 저장된 에너지보다 더 높도록 해야 합니다. 그림 1에 표시된 LLC-SRC를 예로 사용하면, 방정식 1에서 이 부등성의 유효성이 보장됩니다.

$$L_m I_{Lm}^2 \geq 2 C_{oss} V_{in}^2 \quad (1)$$

여기서 I_{Lm} 은 자화 인덕터 L_m 의 피크 전류이고 V_{in} 은 LLC-SRC의 입력 전압입니다. 방정식 1은 L_m 에 대한 인덕터에 옴의 법칙을 적용하여 방정식 2로 고칠 수 있습니다.

$$L_m \leq \frac{n^2 V_{out}^2}{32 C_{oss} V_{in}^2 F_{sw}^2} \quad (2)$$

여기서 $n = N_p : N_{s1}$ (N_{s1} 을 N_{s2} 라고 가정)은 변압기 권선 비율이고 V_{out} 은 출력 전압입니다.

공진 컨버터 설계에서 넓은 작동 범위 및 홀드업 시간을 처리해야 하는 경우 $L_n = L_m/L_r$ 을 낮게 유지하기 위해(폐쇄형 루프 LLC-SRC 설계에서 4~10의 L_n 값 적용) L_m 은 일반적으로 방정식 2 우변의 값보다 훨씬 더 작습니다. 버스 컨버터 등의 공진 컨버터 설계에서 높은 컨버터 효율이 필요한 경우에는 L_m 을 최대화하면 더 낮은 전도 손실을 위해 1차측 RMS 전류가 줄어듭니다. 이 경우 L_m 값은 방정식 2 우변의 값에 가까워집니다. 하지만 방정식 2는 이상적인 변압기를 사용한 이상적인 상태를 나타낼 뿐입니다. 실제 변압기에서는 많은 매개 변수가 C_{oss} 충전 및 방전 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. 가장 중요한 매개 변수는 권선 내 커패시턴스입니다.

그림 4에서는 LLC-SRC 스위칭 과도 중의 간소화된 회로 모델을 보여줍니다. 여기서 $L_m(I_{Lm})$ 의 전류는 C_{eq} (공진 커패시터 C_r 과 직렬로 연결된 FET 2개의 C_{oss})를 방전시킵니다(C_r 을 전압 소스라고 가정함). 변압기 권선 내 커패시턴스(C_{TX})가 없으면 모든 I_{Lm} 이 C_{eq} 로 이동하며 방정식 2는 유효합니다. 그러나 C_{TX} 가 있으면 변압기 권선 극성을 바꾸기 위해 일부 I_{Lm} 이 C_{TX} 로 이동해야 하며, 이로 인해 C_{oss} 방전 성능이 줄고 ZVS 미달성 가능성이 생깁니다. 따라서 1차측 권선 계층을 각 계층과 이격하고 2차측 권선 계층과도 이격하여 C_{TX} 를 낮게 유지하는 것이 필수적입니다.

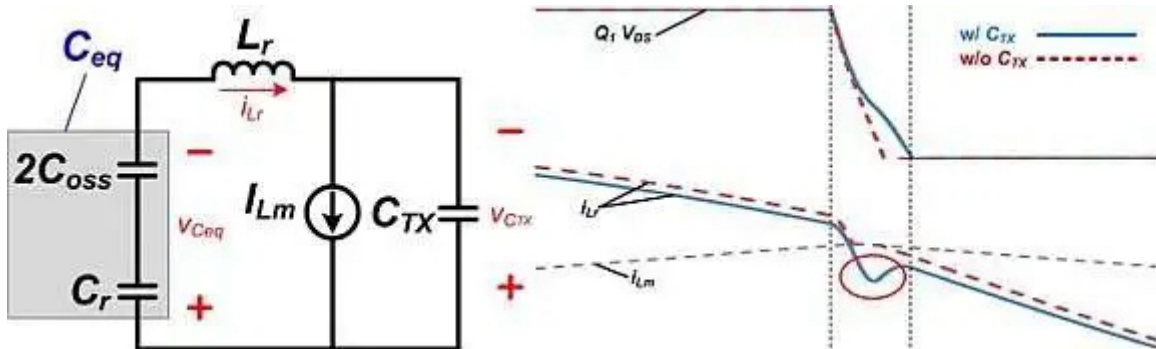


그림 4. 변압기 권선 내 커패시터의 효과

경험에 근거한 L_m 값을 결정하는 방법은 방정식 2를 사용하여 계산된 최대 L_m 값의 절반만 사용하는 것입니다. 이는 일반적으로 실제로 변압기를 만들기 전에 C_{TX} 값을 예측하는 것이 어렵기 때문입니다. C_{TX} 는 일반적으로 400V 입력의 컨버터에서 22pF~100pF의 범위에 속합니다. 또한 변압기 구조가 정해진 후에는 마진을 두고 충분히 낮은 L_m 을 보장하기 위해 회로 시뮬레이션에서 C_{TX} 를 모델링하는 것이 큰 도움이 됩니다.

시리즈의 다음 회에서는 고주파 공진 컨버터 설계에서의 동기 정류기 설계 과제에 대해 중점적으로 다룹니다.

관련 문서:

- [Power Tips #84: Think outside the LLC series resonant converter box](#)
- [MOSFET Qrr: Ignore at your peril in the pursuit of power efficiency](#)
- [하프 브리지 공진 LLC 컨버터 및 1차측 MOSFET 선택 시 설계 고려 사항](#)
- [많은 유사 공진과 공진 컨버터 사용](#)

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