

Technical Article

# EV 온보드 충전기용 CLLLC와 DAB 비교



Brent McDonald

전기 자동차(EV)의 전력을 최적화하려면 온보드 충전기(OBC)는 고효율, 경량, 작은 크기여야 합니다. 또한 EV가 가벼워지면 차량 이동에 필요한 전력이 적기 때문에 전체적인 효율성이 높아집니다.

OBC는 적절한 G2V(그리드-차량) 전압 및 전류 배터리 충전 알고리즘을 지원해야 합니다. 따라서 전력망과 EV(그림 1) 사이의 전력 조절 인터페이스 역할을 합니다. 또한 EV가 변동하는 최대 용량을 가질 수 있는 재생 가능 에너지를 보완할 수 있도록 V2G(차량 대 그리드)의 전력을 제공할 수 있어야 합니다.

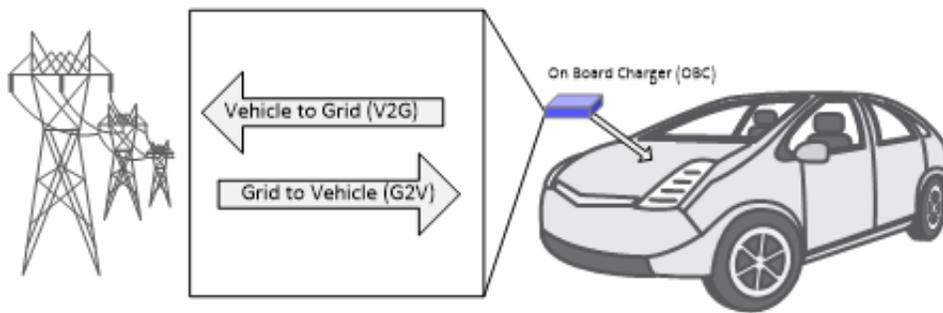


그림 1. OBC는 적절한 G2V 전압을 지원하고 V2G에서 전력을 제공해야 합니다.

EV 내부의 고전압 배터리와 전력망의 인터페이스를 촉진하려면 EMI(전자기 간섭) 필터, PFC(역률 보정) 및 절연 DC/DC 전력계가 필요합니다. 그림 2은 이 아키텍처를 보여줍니다.

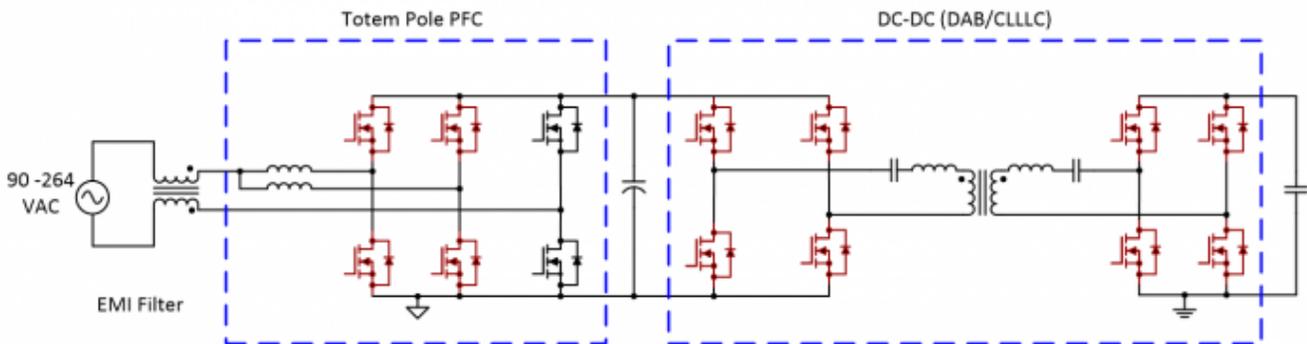


그림 2. 이 간소화된 회로도는 OBC가 전력망과 배터리 사이의 인터페이스 역할을 하는 방법을 보여줍니다.

본 논의의 범위는 DC/DC 단계로 한정됩니다. 이 글을 쓸 때 DC/DC 단계에서 인기 있는 두 가지 선택은 커패시터-인덕터-인덕터-인덕터-커패시터(CLLLC)와 듀얼 액티브 브리지(DAB) 토폴로지(그림 3 및 4)입니다. 두 옵션 모두 작은 솔루션 크기를 달성할 수 있으며 필요한 G2V 및 V2G 전력 요구 사항을 제공합니다.

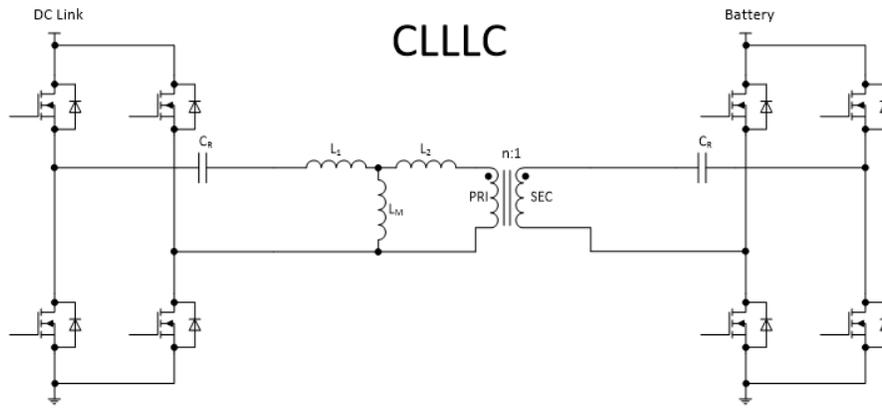


그림 3. 이 회로도는 CLLLC의 기본 토폴로지를 보여줍니다.

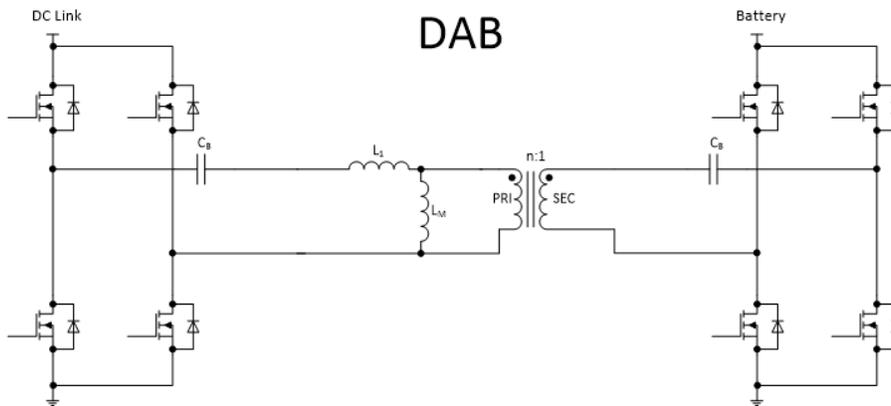


그림 4. DAB 토폴로지는 이 회로도에 나와 있습니다.

### OBC 성능을 극대화하고 크기를 최소화합니다

이 두 가지 토폴로지 옵션이 OBC의 크기와 성능에 미치는 영향을 이해하기 위해 범위를 배터리 충전 작동 단계 또는 G2V로 더 제한하여 스위치가 허용할 수 있는 최대 배터리 전력을 제공하여 충전 시간을 최소화하는 방법을 고려해 보겠습니다. 예를 들어 다음과 같은 작동 조건에서 스위치를 예로 들어 보겠습니다.

- $P_{DISS} = 20 \text{ W}$
- $\theta_{JA} = 3^\circ\text{C/W}$
- $T_A = 65^\circ\text{C}$

스위치는 방정식 1에 따라  $T_J = 125^\circ\text{C}$ 입니다.

$$T_J = P_{DISS} \cdot \theta_{JA} + T_A \quad (1)$$

이 설계의 스위치는  $125^\circ\text{C}$  이상의 온도를 견딜 수 없으므로 이 조건은 스위치의 성능 저하 없이 OBC가 배터리에 제공할 수 있는 최고 전력 레벨을 나타냅니다. 목표는 스위치의 전력 손실을 최소화하고 배터리를 최대한 빨리 충전하는 것입니다.

스위치에서 전력 손실의 대부분을 유발하는 두 가지 주요 요인은 평균제곱근(RMS) 전류와 스위치의 제로 전압 스위칭(ZVS) 유지 기능입니다.

낮은 커패시턴스와 빠른 턴온 및 턴오프 특성을 감안하여 텍사스 인스트루먼트의 GaN 스위치를 사용하면 컨버터는 실리콘으로 가능한 것보다 더 높은 스위칭 주파수에서 작동할 수 있습니다. 고주파 작동은 무효 구성 요소의 크기에 직접 영향을 미치며 이로 인해 변압기, 인덕터 및 커패시터가 더 작아집니다. DAB 및 CLLC에 대한 기준 설계를 설정하고, 컨버터의 ZVS 범위를 확장하기 위한 회로 향상 기능을 살펴보겠습니다.

## 기본 DAB 및 CLLLC 성능 비교

표 1에는 OBC의 기본 요구 사항이 나와 있습니다.

표 1. OBC 전원 요구 사항.

Description	Min	Typ	Max	Units
AC input voltage	90	220	264	V <sub>RMS</sub>
AC input current			32	A <sub>RMS</sub>
DC output voltage	250	400	450	V
DC output current (constant current mode)			20	A
DC output power (constant power mode): >210-V RMS input			6.6	kW

DAB 및 CLLLC에 대한 세부 설계를 만들면 가장 실용적인 탱크 설계를 결정하는 데 도움이 됩니다. 이 작업을 수행하는 절차는 이 논의의 범위를 벗어납니다. 그러나 회로 시뮬레이션은 스위치의 손실을 적절히 추정하고 전체 기능의 준수를 확인하는 데 가장 적합합니다. 저는 다양한 전력 레벨 및 입력 및 출력 전압에서 배치 모드에서 실행되도록 시뮬레이터를 구성했으며, 다양한 DAB 및 CLLLC 인덕터, 커패시터 및 변환 비율 값을 테스트했습니다. 각 시뮬레이션 실행에서 VIN, VOUT, 스위치 전원, RMS 전류 및 스위치 ZVS 조건과 같은 매개 변수에 대한 데이터를 수집했습니다. 표 2에 보면 최적화된 두 가지 토폴로지 설계가 요약되어 있습니다.

표 2. DAB 및 CLLLC에 최적화된 설계.

Topology	DAB	CLLCC
Tank	$N_p/N_s = 1.1$ $L = 3.3 \mu\text{H}$ $L_M = 20 \mu\text{H}$	$N_p/N_s = 1.1$ $L_{R,1} = 2 \mu\text{H}$ $L_{R,2} = 2 \mu\text{H}$ $L_M = 14 \mu\text{H}$ $C_{R,1} = 50 \text{ nF}$ $C_{R,2} = 50 \text{ nF}$
Control	Triple phase-shift modulation	Frequency and phase-shift modulation
Variable DC link	400 V to 450 V	400 V to 450 V
$f_s$	500 kHz	300 kHz-800 kHz

그림 5은 대표적인 시뮬레이션 결과를 보여줍니다. 각 토폴로지에는 8개의 스위치가 있지만 그래프는 전력 손실이 가장 높은 스위치만 표시합니다. 각 스위치에는 3개의 플롯이 있습니다. 첫 번째는 스위치의 총 손실입니다. 두 번째는 해당 스위치를 통과하는 RMS 전류입니다. 맨 오른쪽의 세 번째 플롯은 특정 GaN 스위치를 켤 때 발생하는 최악의 드레인-소스 전압을 보여줍니다. 이는 ZVS가 손실된 정도를 보여주는 성능 지수입니다. 이 전압이 높을수록 해당 스위치에서 손실이 커집니다. 따라서 스위치의 RMS 전류와 ZVS 유지 기능은 장치의 전력 손실에서 가장 큰 부분을 차지합니다.

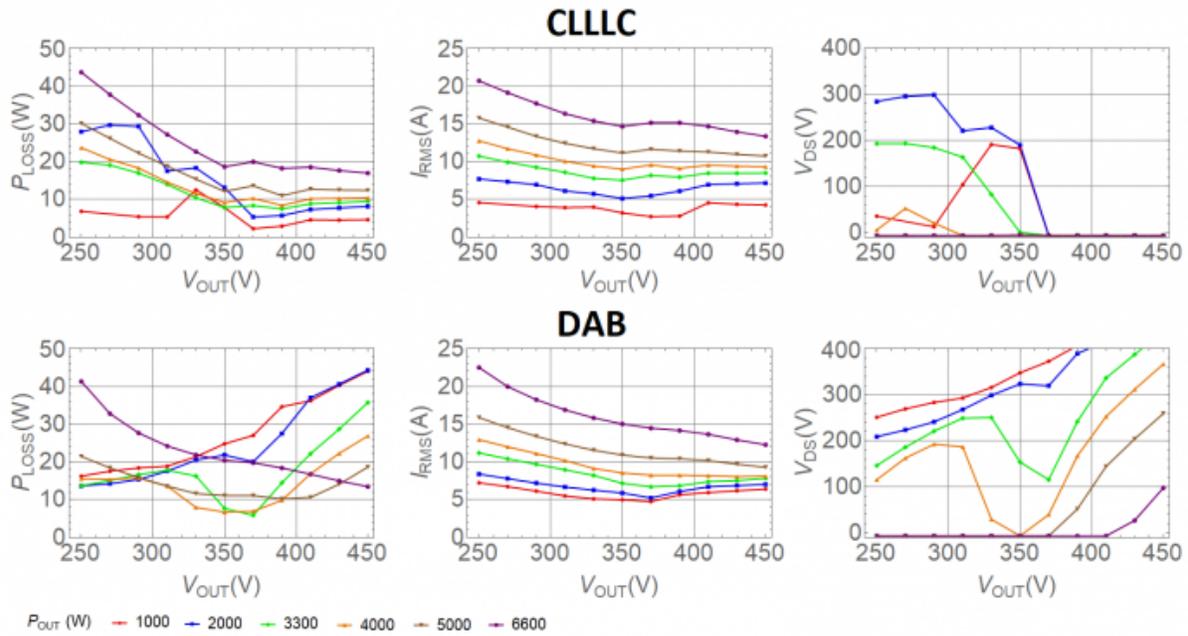


그림 5. 시뮬레이션 결과는 CLLC 및 DAB의 RMS 및 ZVS 기준 조건을 보여줍니다.

이러한 사실과 데이터를 신중하게 검사한 후 CLLC는 더 넓은 작동 범위에 걸쳐 ZVS를 유지할 수 있음을 명확히 알 수 있습니다. 따라서 향상된 ZVS는 CLLC 스위치에서 발생하는 낮은 전력 손실을 책임집니다. 이와 같이 6.6kW 작동 시 DAB는 탁월한 성능을 제공하며 이는 대부분의 범위에서 양호한 ZVS와 감소된 RMS 전류로 인한 것입니다. 이러한 관찰 결과는 RMS 전류에 부정적인 영향을 주지 않고 ZVS를 개선할 수 있는 방법을 모색하는 것을 의미합니다.

### 정류 인덕터를 통한 ZVS 개선

그림 6 및 그림 7은 그림 3 및 4와 동일한 CLLC 및 DAB 회로를 보여줍니다. 토폴로지에 추가 인덕터(노란색으로 강조 표시됨)를 추가하여 더 넓은 작동 범위에서 ZVS를 유지하는 데 필요한 추가 전류를 제공합니다. 지금은 이러한 추가 인덕터가 항상 작동하는 경우를 생각해 보겠습니다.

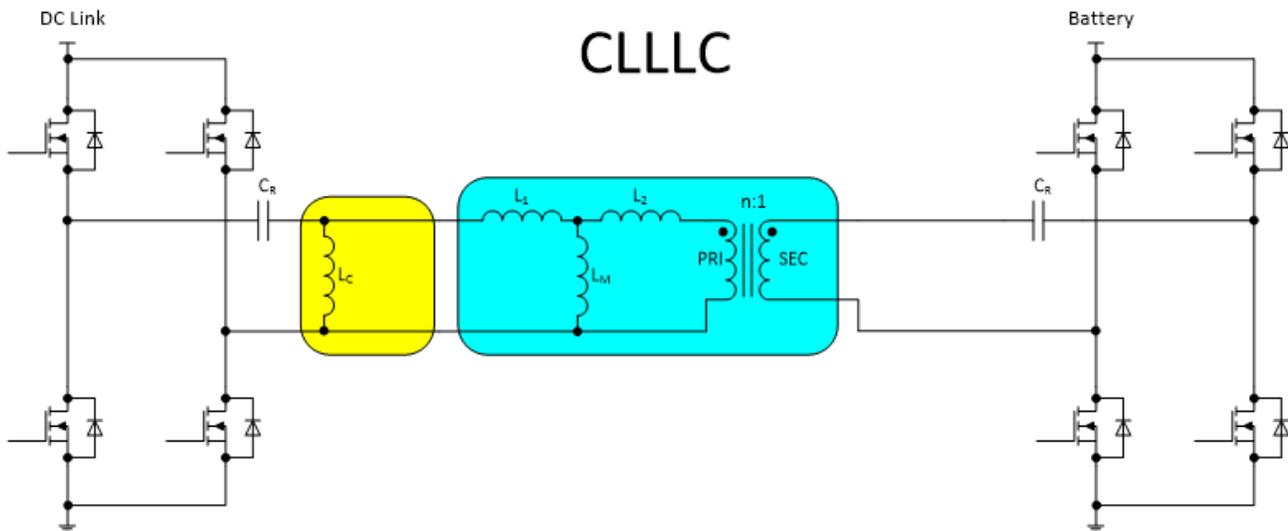


그림 6. 이 회로도에는 정류 인덕터가 있는 CLLC를 보여줍니다.

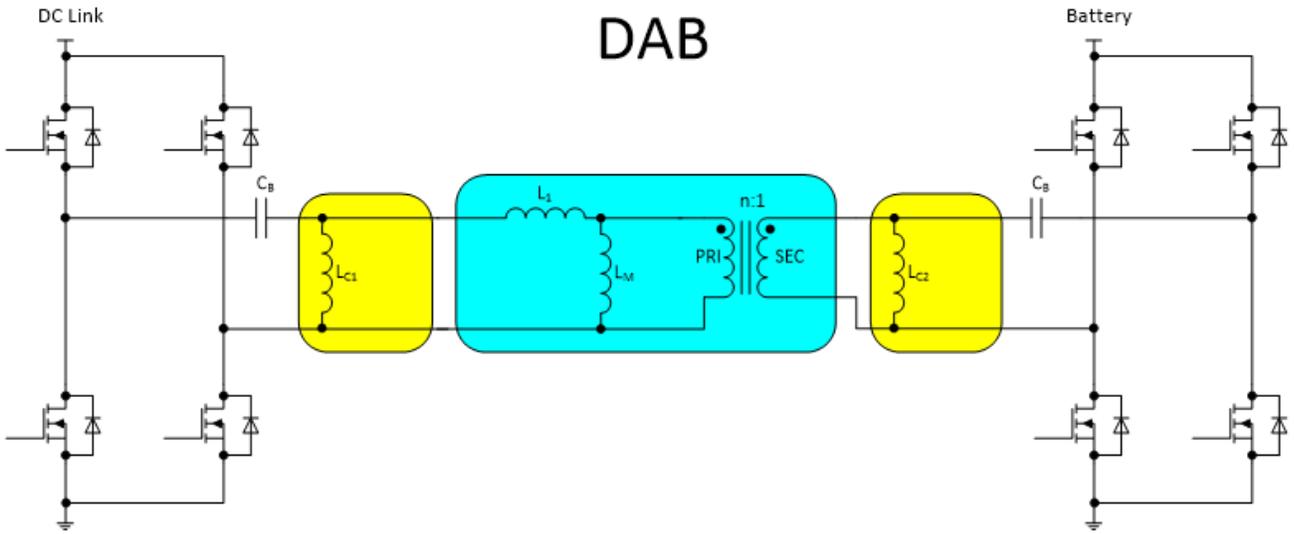


그림 7. 이 회로도는 통신 인덕터가 포함된 DAB를 보여줍니다.

표 3에는 새 인덕터의 값이 나열되고 편의를 위해 다른 탱크 매개 변수가 반복됩니다.

표 3. 정류 인덕터( $L_C$ ) 값을 갖춘 DAB 및 CLLC 설계

Topology	DAB	CLLc
Tank	$N_p/N_s = 1.1$ $L = 3.3 \mu\text{H}$ $L_M = 20 \mu\text{H}$ $L_C = 20 \mu\text{H}$	$N_p/N_s = 1.1$ $L_{R,1} = 2 \mu\text{H}$ $L_{R,2} = 2 \mu\text{H}$ $L_M = 14 \mu\text{H}$ $C_{R,1} = 50 \text{nF}$ $C_{R,2} = 50 \text{nF}$ $L_C = 50 \mu\text{H}$

그림 8은 그림 5에서 시뮬레이션을 반복한 후의 결과를 표시합니다.

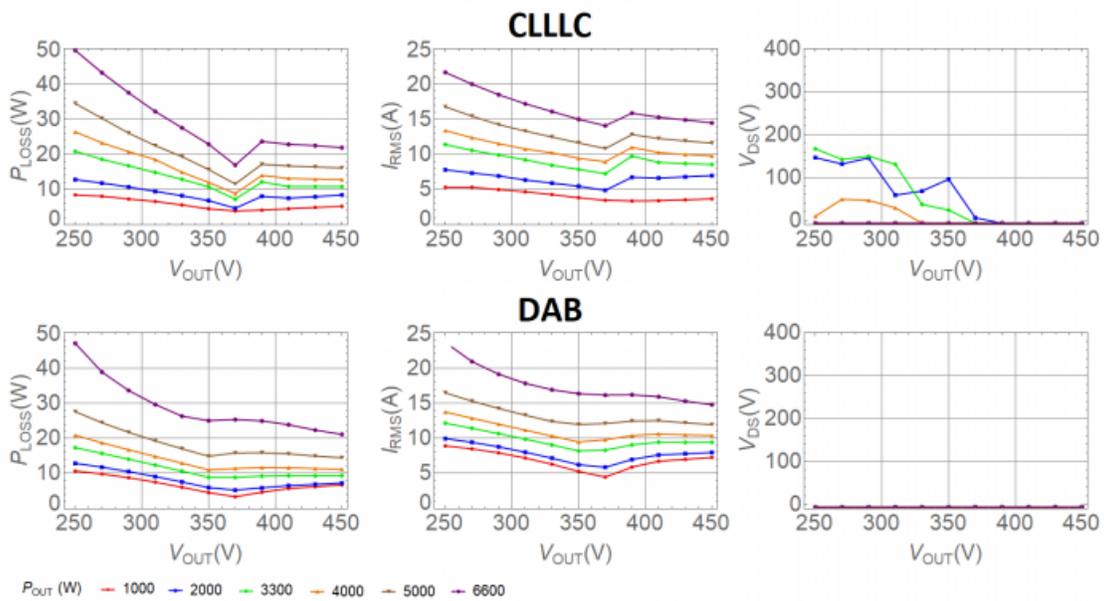


그림 8. 각 회로의 RMS 및 ZVS 결과는  $L_C$ 의 영향을 보여줍니다.

이 경우 DAB는 전체 작동 조건 범위에서 완전한 ZVS를 달성할 수 있습니다. 이는 GaN 스위치의  $V_{DS}$ 가 켜져 있을 때 항상 0V라는 사실을 명확히 알 수 있습니다. CLLC는 완전한 ZVS를 달성하지 않지만 상당히 향상된 ZVS를 달성할 수 있습니다. 또한 ZVS 향상은 두 토폴로지의 RMS 전류에 상당한 비용이 발생함을 알 수 있습니다. 전력 손실만 보면 DAB 컨버터가 대부분의 범위에 비해 많은 이점을 제공하는 것으로 나타납니다.

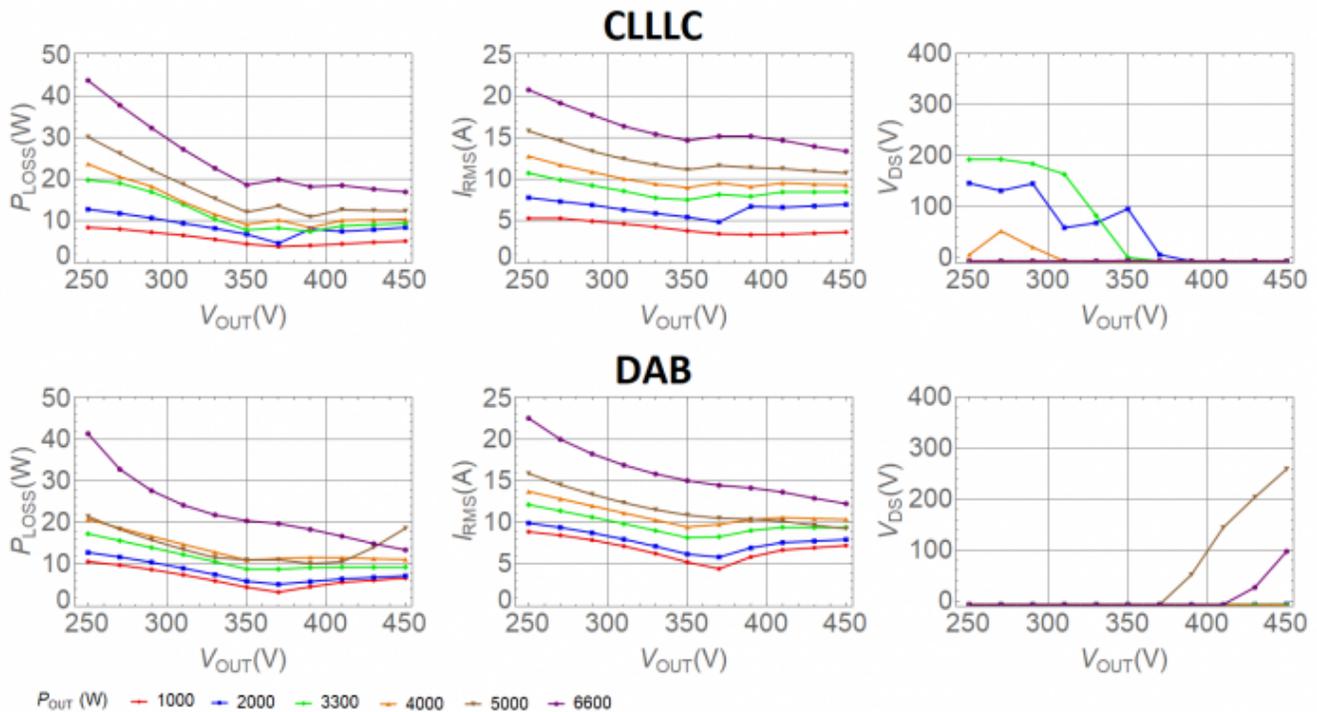
너무 멀리 가기 전에 돌아가서 **그림 8**와 **그림 5**를 비교하면, 일부 조건에서는 정류 인덕터가 실제로 손실을 악화시킵니다. 이 문제는 **그림 5** 및 **그림 8**에 표시된 손실의 최소치를 달성할 수 있는 하이브리드 접근 방식을 만들 수 있습니까?

### 전체 손실을 최소화 : 일거양득

정류 인덕터를 추가하면 컨버터가 ZVS를 유지하는 더 광범위한 작동 조건이 생성됩니다. 이는 컨버터가 ZVS를 유지할 수 없을 때 엄청난 이점이 있습니다. 정류 인덕터의 문제는 ZVS가 손실될 때만 손실을 개선한다는 것입니다. 컨버터가 이미 ZVS에 있는 경우 정류 인덕터는 전류를 증가시켜 스위치에서 더 많은 옴 손실을 초래하여 작동을 방해합니다.

이러한 사고 과정을 통해 더 무거운 부하에서는 정류 인덕터를 끄고 더 가벼운 부하에서는 켜는 하이브리드 접근 방식을 테스트하게 됩니다. **그림 9**은 이 접근 방식으로 시뮬레이션을 반복한 후 결과를 보여줍니다. 이를 통해 설계가 각 토폴로지의 낮은 RMS 전류와 고부하에서 자연스러운 ZVS 기능을 활용할 수 있습니다.

저는 스위치에 불필요한 RMS 전류나 불필요한 솔루션 크기를 막기 위해 스위치의 열 엔벨로프 안에 맞는 충분한 정류 인덕턴스와 작동 시간만 추가하는 데 주의를 기울였습니다. DAB 컨버터는 작동 범위에서 전체 ZVS를 달성하지 못합니다. ZVS 조건은 훨씬 개선되지만 앞서 설명한 20W 스위치 목표를 유지하는 데 필요한 만큼만 개선됩니다.



**그림 9.** 이는 하이브리드 접근 방식을 사용하는 RMS 및 ZVS 결과입니다.

장단점을 더 잘 시각화하기 위해 **그림 10**에서는 각 사례의 전력 손실을 요약합니다. DAB 컨버터가 스위치의 전력 손실 측면에서 분명한 이점을 가지고 있음을 알 수 있습니다.

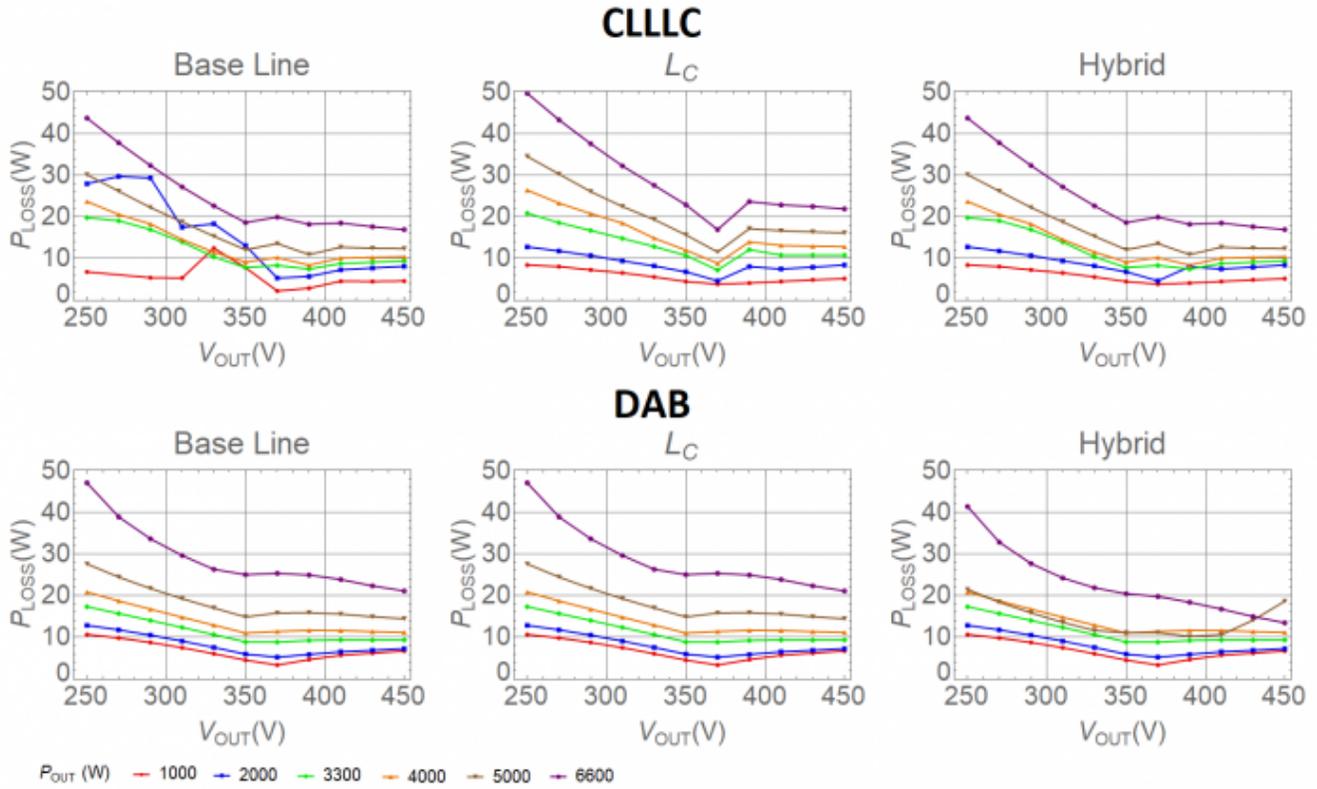


그림 10. 각 사례의 전력 손실을 요약하면 장단점을 시각화하는 데 도움이 됩니다.

이러한 두 컨버터 간의 성능 기능을 더 잘 설명하기 위해 그림 11은 그림 10에 나와 있는 데이터를 재포맷하고 플롯합니다. 그래프는 스위치가 안전하게 20W 이상의 전력을 소모할 수 없다고 가정하고 각 컨버터가 공급할 수 있는 최대 전력을 보여줍니다. 20W는 스위치가 허용할 수 있는 최대 손실을 나타내며 접합부 온도를 125°C 미만으로 유지합니다

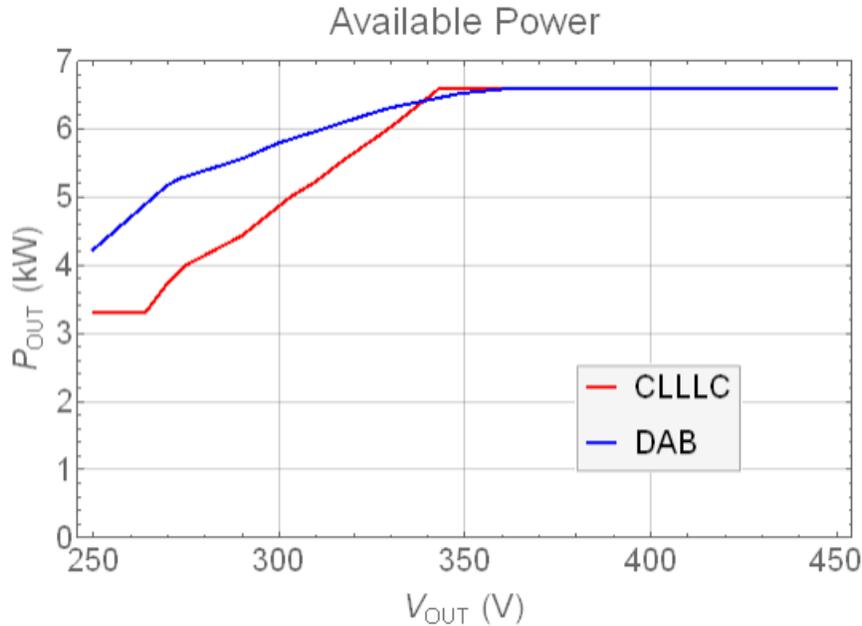


그림 11. 이 플롯은 각 컨버터가 공급할 수 있는 최대 전력을 보여줍니다.

## CLLLC 또는 DAB 중 어느 것이 더 나올까요?

그림 11의 파란색 선이 빨간색 선보다 높다는 사실에서 알 수 있듯이 DAB 컨버터는 CLLLC보다 전체 범위에서 더 많은 전력을 제공할 수 있습니다. 따라서 DAB가 확실한 승자라고 생각할 수 있습니다. 하지만 최소한의 크기와 중량이 OBC의 중앙 요구 사항이라는 것을 기억하십시오. DAB 컨버터는 추가 인덕터가 2개 필요하지만 CLLLC는 1개만 필요합니다. 제 생각에는 CLLLC가 승리한 것으로 보입니다.

엔지니어링의 대부분의 경우와 마찬가지로 가장 좋은 것은 거의 항상 요구 사항에 대한 절충의 문제입니다. 큰 장점이 무료로 제공되는 것은 매우 드문 일입니다. 제가 보기에 CLLLC는 크기 면에서 확실한 이점이 있기 때문에 DAB보다 우위에 있는 것 같습니다.

### 참고 자료

1. DE Oliveira, E.F., 및 P. Zacharias, "E-Vehicle 애플리케이션을 위한 양방향 CLLC 공진 컨버터의 포괄적인 모드 분석 및 최적의 설계 방법," 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), Sept. 3-5, 2019, pp. 1-10.
2. Krismer, F. 및 J.W. Kolar, "차량용 애플리케이션을 위한 효율성 최적화 고전류 듀얼 액티브 브리지 컨버터", IEEE Transactions on Industrial Electronics 59, no. 7 (July 2012): pp. 2745-2760.
3. Texas Instruments. n.d., "질화 갈륨(GaN): 실리콘 이상의 성능," 2020년 10월 19일 액세스함.

### 관련 문서

- 전기 자동차 충전: 기술과 스마트 엔지니어링으로 전기의 미래를 실현하는 방법
- 전기 자동차의 무선 충전을 위한 전력 전송
- GaN으로 효율적이고 비용 효율적인 800V EV 트랙션 인버터 구현
- 휴대용 충전 솔루션은 EV를 위한 긴급 출동 지원을 제공
- 전원 팁 #75: 오토모티브 시스템용 USB 전원 공급
- 전원 팁 #92: 고주파 공진 컨버터 설계 고려 사항

이전에 [EDN.com](https://www.edn.com)에 게시됨 .

## 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://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 제안할 수 있는 추가 또는 기타 조건을 반대하거나 거부합니다.

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

Copyright © 2024, 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated