

Technical Article

고주파 공진 컨버터 설계 고려 사항, 2부



Sheng-Yang Yu

이 시리즈의 첫 번째 편에서는 공진 컨버터 설계에 영향을 미치는 주요 기생 매개 변수와 부품 선택 조건, 변압기 설계에 초점을 맞추었습니다. 이 편에서는 공진 컨버터 동기 정류기(SR) 설계 고려 사항에 대해 중점적으로 다룹니다.

공진 컨버터의 작동 상태는 펄스 폭 변조 컨버터보다 훨씬 더 복잡할 수 있습니다. 그림 1에서 LLC-SRC(인덕터-인덕터-커패시터 시리즈 공진 컨버터)를 예로 들면, 일반 LLC-SRC 설계에 주어진 부하 조건과 스위칭 주파수(f_{sw})와 직렬 공진 주파수(f_r)의 상대 위치가 4가지 공통 상태(그림 2)가 있습니다. f_{sw} 이면 활성 스위치(Q_1 또는 Q_2)가 꺼지기 전에 정류기 다이오드 전류가 0이 됩니다. 따라서 정류기(즉, SR)로 금속 산화막 반도체 전계 효과 트랜지스터(MOSFET)를 적용할 때 정류기 전류 역흐름을 피하기 위해 SR은 50% 미만의 듀티 사이클로 꺼져야 합니다. 그렇지 않으면 과도한 순환 전류로 인해 컨버터 효율이 저하됩니다.

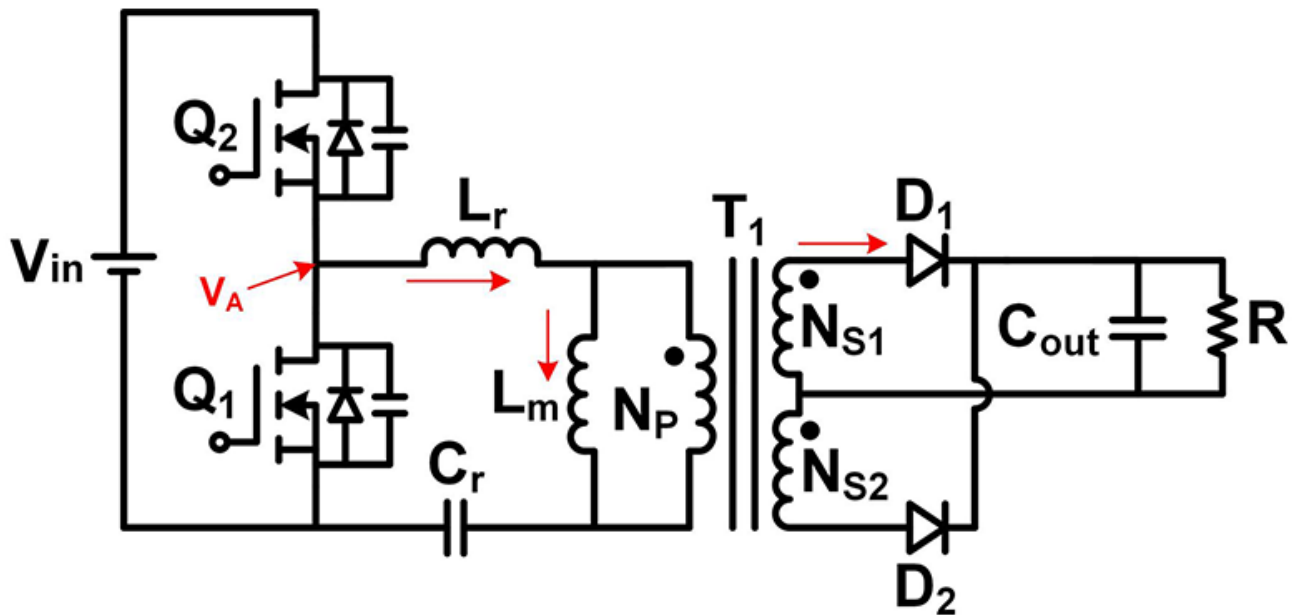


그림 1. LLC-SRC(인덕터-커패시터 시리즈 공진 컨버터)는 고주파 작동을 지원하는 소프트 스위칭 기능을 제공합니다.

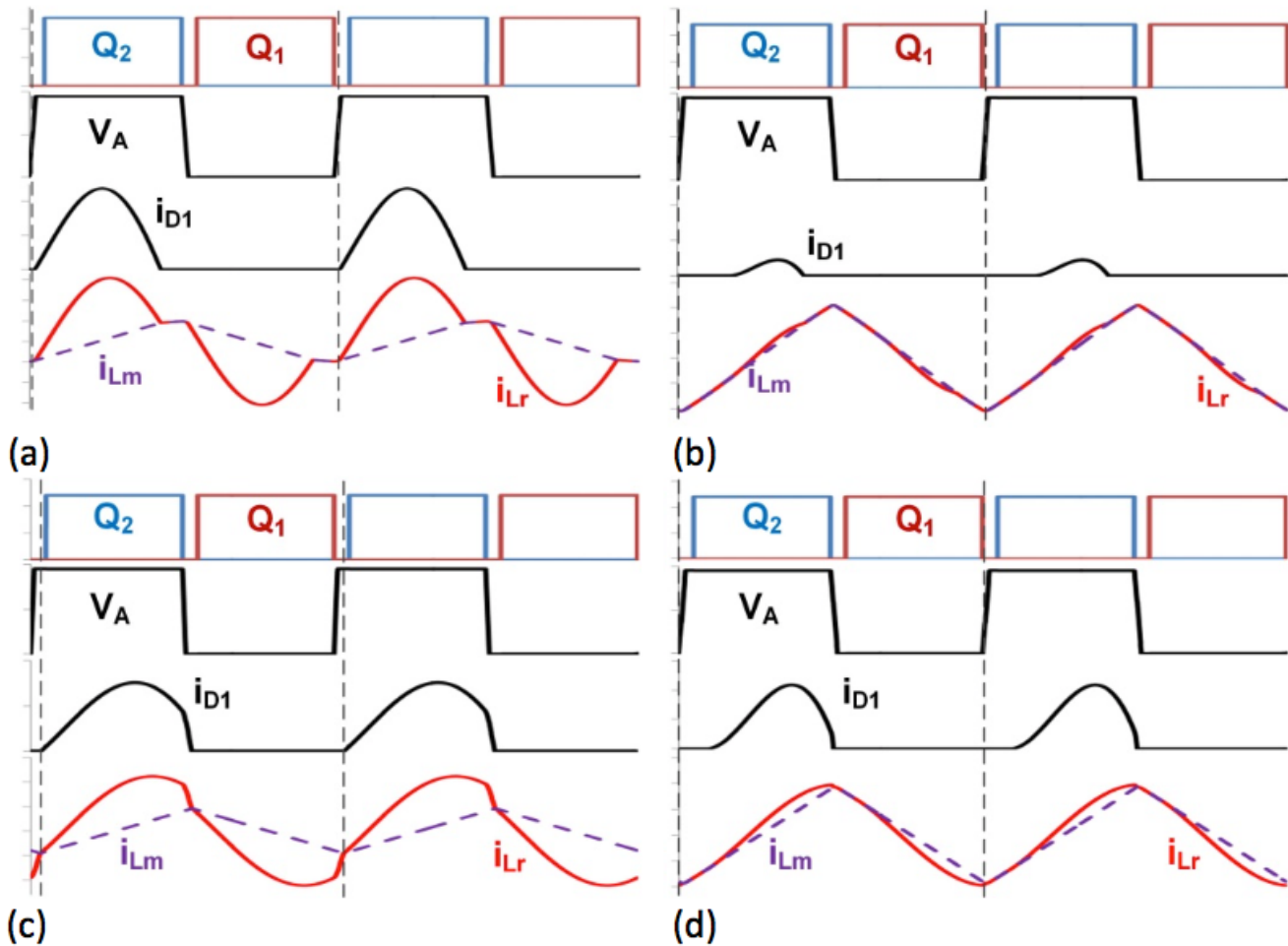


그림 2. 과부하 $f_{sw} r$ (a), 경부하 및 $f_{sw} r$ (b), 과부하, $f_{sw} > f_r$ (c), 경부하 및 $f_{sw} > f_r$ (d)에서의 LLC-SRC 작동 상태는 SR이 적용된 경우 출력 정류기에서 역전류 흐름을 방지하기 위한 전류 감지의 필요성을 보여줍니다.

정류기 전류 전도 시간은 $f_{sw} r$ 일 때 과부하에서 $0.5/f_r$ 입니다. 따라서 $f_{sw} r$ 을 사용할 때 고부하에서 SR 전도 시간을 $0.5/f_r$ 보다 약간 작게 제한하고 더 낮은 부하에서 SR을 비활성화하는 것이 가능합니다[1]. 하지만 이 개방형 루프 SR 제어 방법은 컨버터 효율성을 최적화할 수 없습니다.

보다 안정적인 SR 제어 방법은 MOSFET 드레인-소스 전압(V_{DS}) 감지 [2](그림 3)를 사용하는 것입니다. 기본적으로 이 SR 제어 방법은 MOSFET V_{DS} 를 두 가지 전압 임계값과 비교하여 MOSFET을 켜고 끕니다. 텍사스 인스트루먼트의 UCC24624와 같은 일부 최신 V_{DS} 센싱 SR 컨트롤러에는 최소한의 지연으로 빠른 SR 턴오프를 위해 비례 게이트 드라이버를 활성화하는 세 번째 전압 임계값이 있습니다.

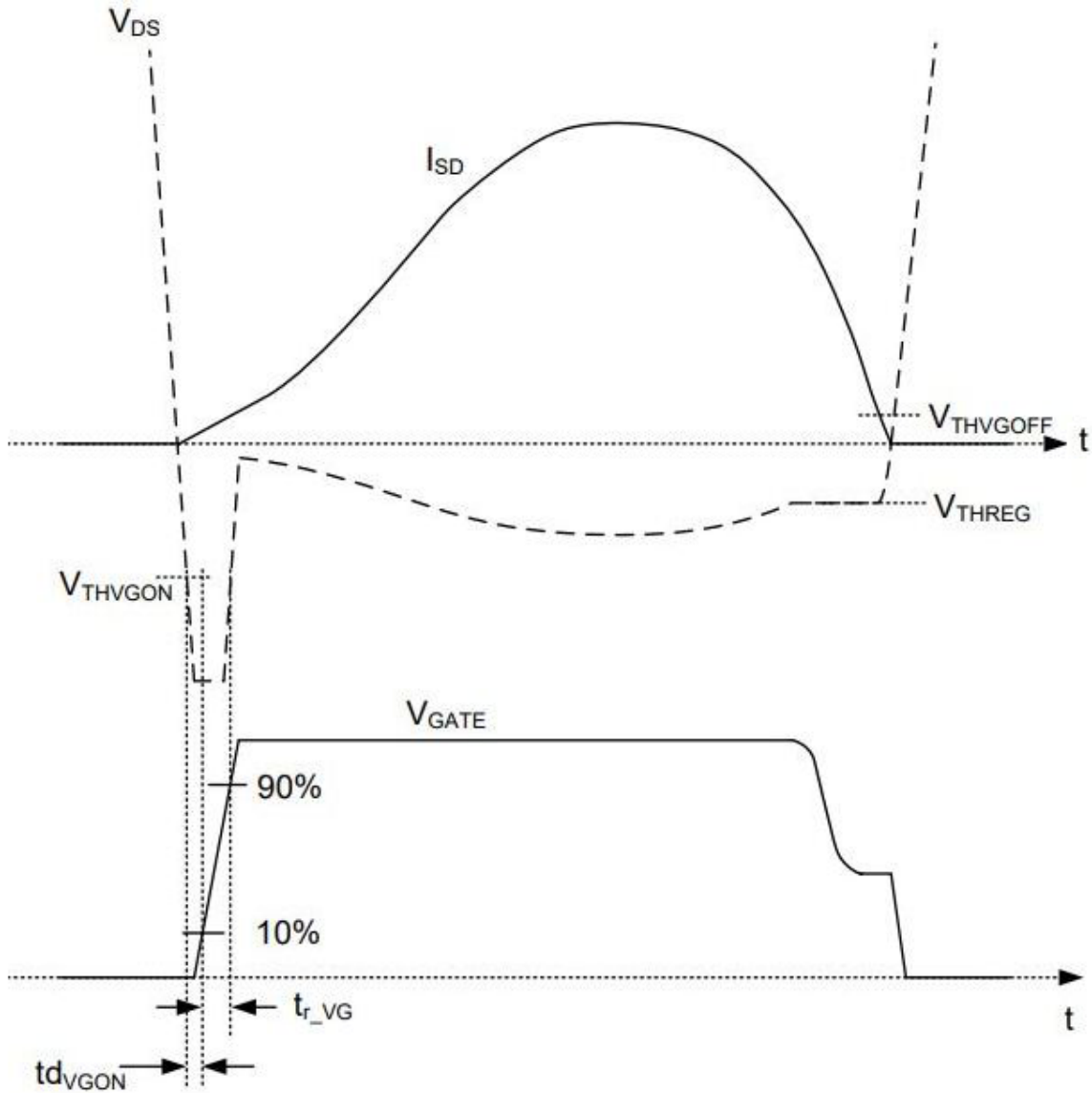


그림 3. V_{DS} 센싱 SR 은 다양한 V_{DS} 전압 레벨에서 SR을 켜고 끕니다.

전압 임계값은 밀리볼트 레벨이며 고정밀 감지 회로가 필요합니다. 따라서 V_{DS} 감지 방법은 일반적으로 V_{DS} 레벨 (일반적으로 200V 미만) 및 f_{sw} 제한(일반적으로 400kHz 미만)이 있는 통합 회로를 사용하여 실현됩니다. V_{DS} 감지 SR 제어 방법의 제한으로 인해 고전압 및 고주파 공진 컨버터의 SR 전도를 최적화하는 다른 SR 제어 방법이 필요합니다.

Rogowski 코일 [3] 뒤에 적분기과 콤퍼레이터를 사용하면 고주파 공진 컨버터 SR을 제어할 수 있는 대체 방법입니다. 그림 4 은 커패시터-인덕터-인덕터-인덕터-커패시터 시리즈 공진 듀얼 액티브 브리지 컨버터(CLLC-SRES-DAB)[4]에서 Rogowski 코일을 사용하는 SR 제어를 보여주는 블록 다이어그램입니다. 권선이 있는 공기 코어 코일인 Rogowski 코일이 전류 감지를 위한 변압기 권선에 배치됩니다. 시간에 따라 변하는 전류가 코일에 흐르면 전류에 의해 생성된 자속이 코일 권선에 전압을 유도합니다. 유도 전압은 원래의 시간 변동 전류와 비교했을 때 90도 위상차를 갖습니다.

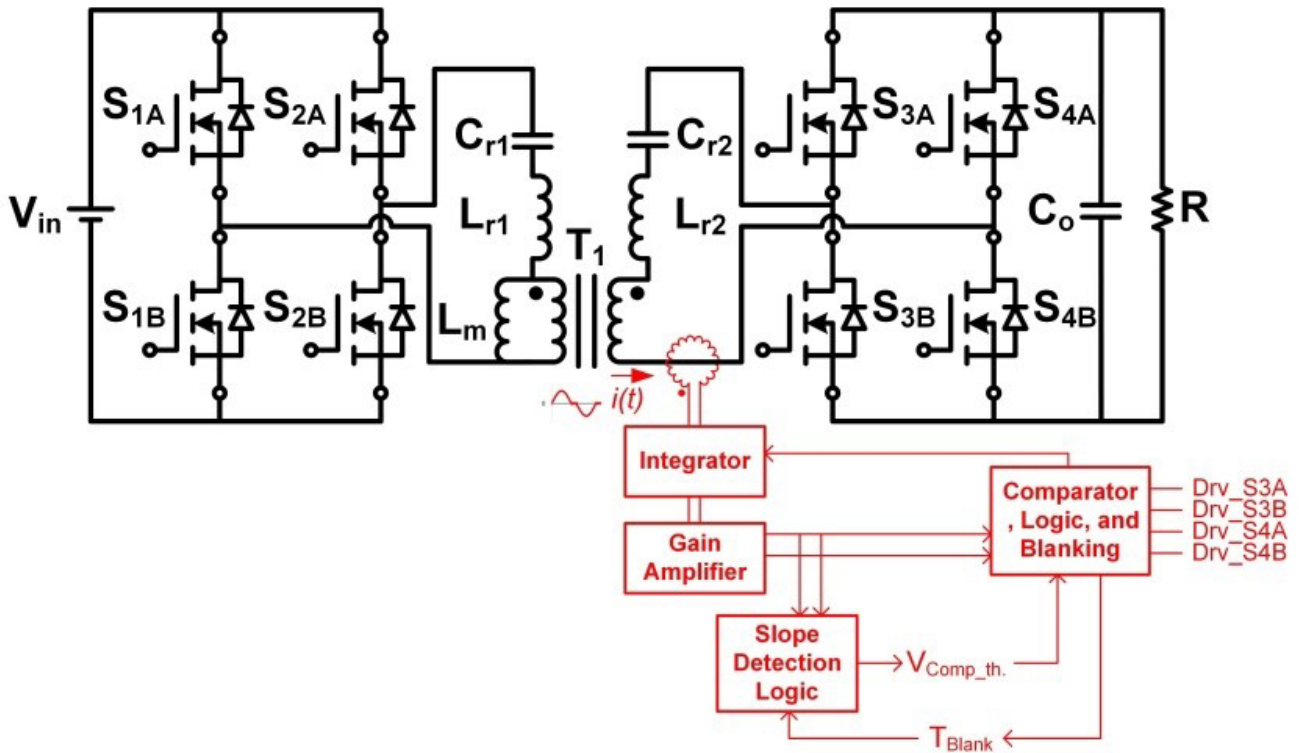


그림 4. Rogowski 코일 SR 제어는 CLLLC-SRes-DAB 컨버터에서 정확한 고주파 SR 감지 및 제어를 지원합니다.

Rogowski 코일 뒤에 적분기를 추가하면 위상 또는 원래 시간 변동 전류를 유도하는 전압을 생성할 수 있습니다. 따라서 가능한 전파 및 제어 지연을 수용할 수 있도록 적분기 출력의 제로 전압 교차를 시간 변동 전류 제로 전류 크로스보다 약간 일찍 설정할 수 있습니다. 그런 다음 증폭된 적분기 출력 신호를 지정된 컴퍼레이터 임계값과 비교하여 거의 최적화된 SR 전도 시간으로 SR 구동 신호를 생성합니다. 제어 회로에 삽입된 추가 기울기 감지 로직은 다양한 부하 조건에서 SR 전도 시간을 더욱 최적화합니다. Rogowski 코일은 자속을 통해 전류를 감지하므로 전압 레벨 제한이 없습니다. 또한 Rogowski 코일은 자기 코어 물질 대신 공기 코어를 사용하므로 대역폭은 포화 제한 없이 매우 높기 때문에 V_{DS} 센싱 SR 제어 방법과 달리 MHz 레벨 공진 컨버터에서도 주파수 제한 문제가 없습니다.

그림 5에서는 여기에서 제안된 방법을 보여줍니다. 그림 5에서 시간에 따라 변하는 전류를 $i(t)$ 로 정의하고 Rogowski 코일이 변압기 권선에 수직으로 배치되어 있다고 가정하면 방정식 1를 사용하여 Rogowski 코일 권선 출력 전압을 다음과 같이 계산할 수 있습니다.

$$V_{1,0}(t) = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서 A 는 Rogowski 코일에 있는 각 회전 단면의 단면 영역입니다(Rogowski 코일의 회전이 모두 단면 면적이 동일하다고 가정함). N 은 Rogowski 코일의 회전 횟수이며, l 은 Rogowski 코일 링의 둘레입니다. 그리고 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m은 투과성 상수입니다.

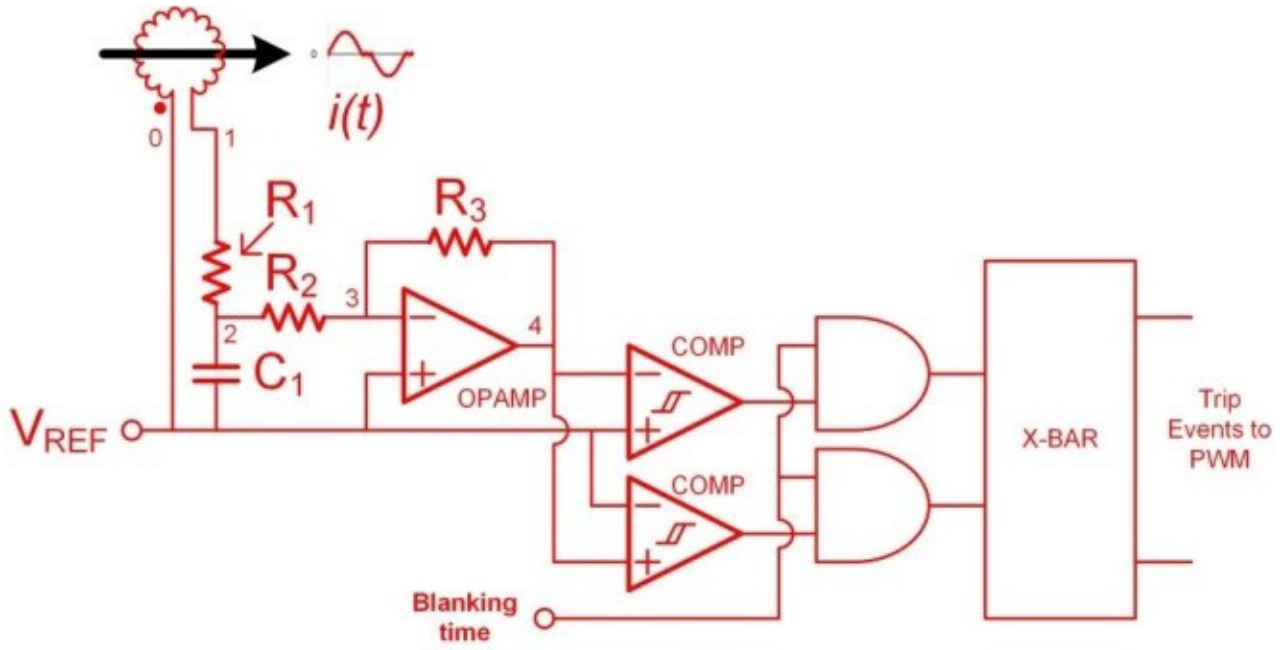


그림 5. 패시브 통합기를 사용하면 Rogowski 코일 SR 제어 회로가 제로 전류 크로싱 타이밍을 예측할 수 있습니다.

제안된 센서 회로에 사용되는 이상적인 연산 증폭기를 사용한다고 가정하면 [방정식 2](#) Rogowski 코일 출력 $v_{1,0}$ 과 수동 적분기 출력 $v_{2,0}$ 사이의 전압 관계를 나타내 줍니다.

$$\frac{dv_{2,0}(t)}{dt} + \left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1}\right)V_{2,0}(t) = \frac{V_{1,0}(t)}{R_1C_1} \quad (2)$$

[방정식 2](#)의 차동 방정식을 [방정식 3](#)의 형태로 해결할 수 있습니다.

$$V_{2,0}(t) = \frac{1}{I} \int I \frac{V_{1,0}(t)}{R_1C_1} dt + \frac{a_0}{I} \quad (3)$$

여기서 a_0 은 [방정식 4](#)에 의해 표시되는 상수입니다.

$$I = e^{\left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1}\right)t} + constant \quad (4)$$

수동 적분기 및 증폭기로 위상차를 조정하는 방법을 더 쉽게 이해하려면 시간 변화 전류가 순수 정현파라고 가정하면 Rogowski 코일 출력 전압과 적분기 출력 모두 순수 정현파가 됩니다. 즉, $v_{2,0}(t) = a_1 \sin(\omega t)$ 라는 가정으로 [방정식 1](#) 및 [방정식 2](#)을 풀어 $i(t)$ 의 해를 구하면 [방정식 2](#)을 [방정식 5](#)로 다시 쓸 수 있습니다.

$$i(t) = \frac{a_1 l}{AN\mu_0} \sin(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

여기서 [방정식 6](#)

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_1\omega}{a_2}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{\omega}{\left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1}\right)}\right] \quad (6)$$

Rogowski 코일의 핀아웃을 뒤집으면 시간에 따라 변하는 전류는 [방정식 7](#)이 됩니다.

$$i(t) = \frac{a_1 l}{AN\mu_0} \sin(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

Rogowski 코일 출력과 적분기 입력 사이에 올바른 연결 극성을 사용하여 R_1 , R_2 , C_1 값과 $f_{sw} (\omega = 2\pi f_{sw})$ 를 변경하여 방정식 3의 경우 $\phi = -\pi/2$ 및 방정식 4의 경우 $\phi = \pi/2$ 를 만들면 적분기 출력 $v_{2,0}(t)$ 는 SR 전류 $i(t)$ 와 위상이 같아질 수 있습니다. 또한 실제 애플리케이션에서는 적분기 파형을 설정하여 SR 전류를 유도할 수 있습니다. 따라서 컨트롤러와 드라이버의 응답 시간과 전파 지연이 각각 제로 전류 크로싱 지점에 있어도 SR 기기 타이밍은 여전히 제로 전류 크로싱 지점에 있을 수 있습니다.

그림 6은 감지 회로의 권선 전류 측정과 게인 증폭기 출력 전압을 보여줍니다. 보시다시피, 실제 감지 전류보다 일찍 꺼지도록 제로 전압 크로싱을 프로그래밍하면 전파 및 제어 지연을 줄일 수 있습니다.

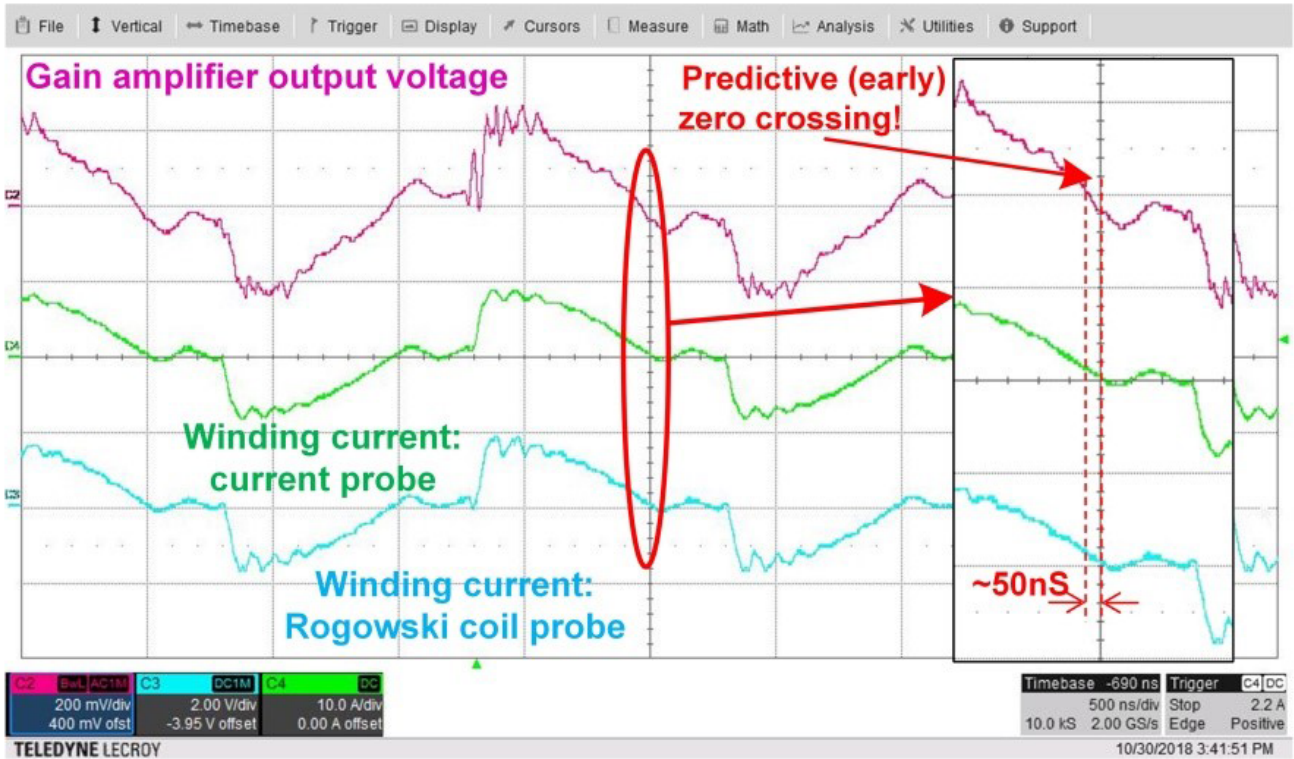
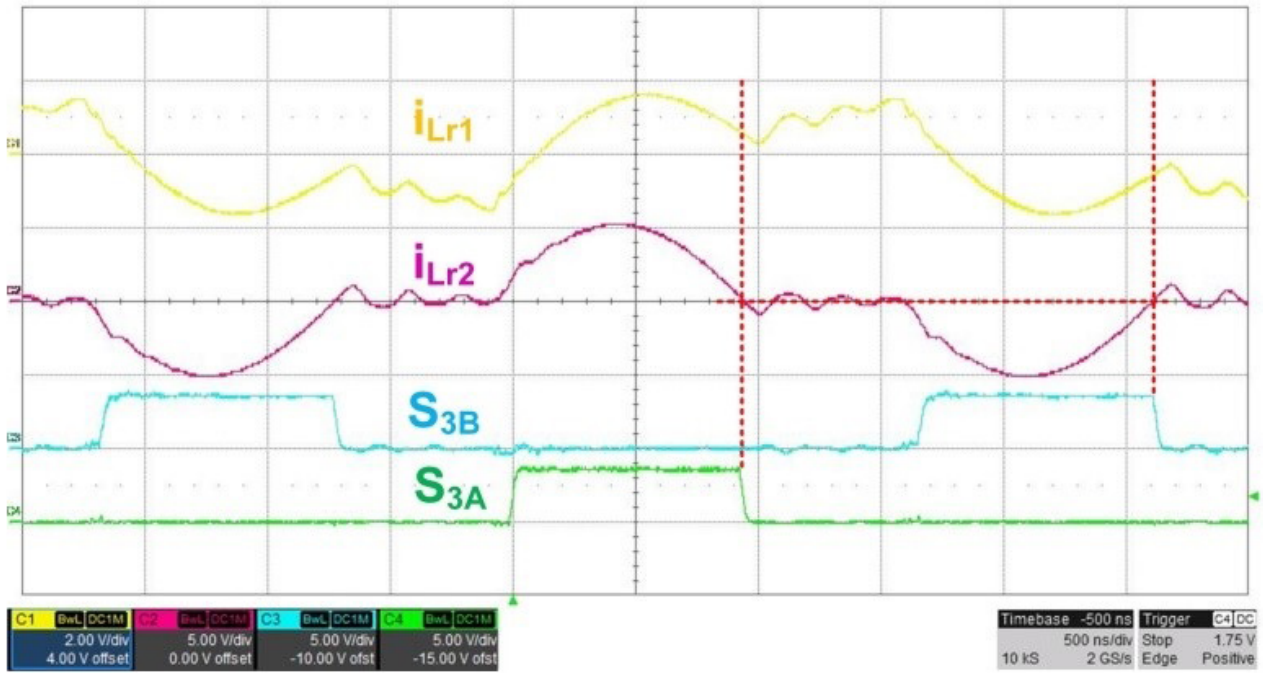
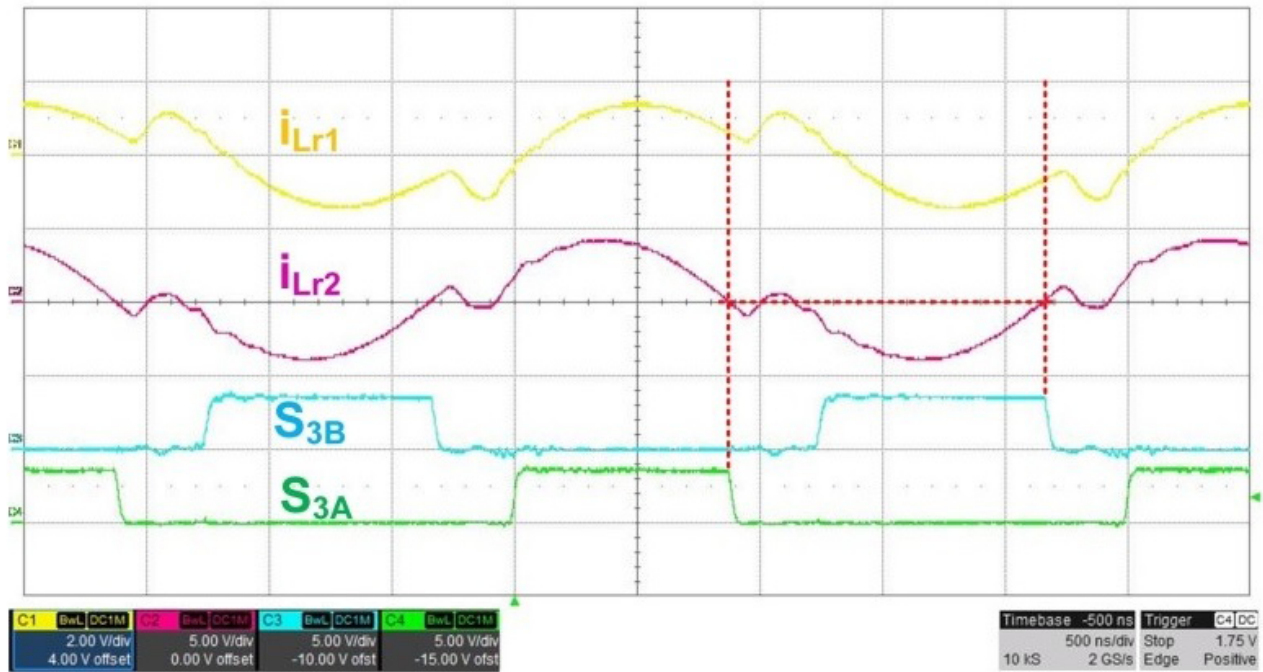


그림 6. 이 SR 전류 측정 비교는 실제 영점 전류 크로싱보다 적분기 출력에서 영점 전류 크로싱이 더 빨리 발생하여 예측 SR 감지를 보여줍니다.

그림 7은 스위칭 주파수가 직렬 공진 주파수보다 낮을 때 완벽한 SR 턴오프 타이밍을 보여줍니다.



(a)



(b)

그림 7. SRS는 300kHz(a) 및 400kHz(b)에서 완벽한 제로 전류 교차에서 꺼집니다.

참고 자료

1. J. Wang 및 B. Lu, " LLC 공진 컨버터를 위한 개방형 루프 동기 정류기 드라이버, "Proc. APEC, 2013, pp. 2048-2051.
2. LLC 공진 컨버터용 UCC24624 듀얼 채널 동기 정류기 컨트롤러, 텍사스 인스트루먼트
3. M.H. Samimi, A. Mahari, M.A. Farahnakian 및 H. Mohseni, "Rogowski 코일 원리 및 적용: 검토," IEEE Sensors Journal, Vol.15, pp. 651-658, 2015.
4. B. Zhao, Q.Song, W. Liu 및 Y. Sun, "고주파-링크 전력 변환 시스템을 위한 듀얼 액티브 브리지 절연 양방향 DC-DC 컨버터의 개요," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, pp. 4091-4106, 2014.

관련 문서

- 전원 팁 #89: 고주파 공진 컨버터 설계 고려 사항, 1부
- 많은 유사 공진과 공진 컨버터 사용
- Rogowski 전류 프로브로 작은 임피던스 측정
- 디지털 제어를 사용한 고효율 공진 모드 구현
- 전원 팁 #84: LLC 시리즈 공진 컨버터 박스에서 벗어나 생각하기

이전에 EDN.com에 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://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 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