

스위칭 주파수의 대역 확산을 통해 전자방해잡음을 저감할 수 있는 LLC 공진형 컨버터

김민아, 박화평, 정지훈
울산과학기술원

LLC Resonant Converter using Spread Spectrum Technique for Reducing EM Noise

Mina Kim, Hwa Pyeong Park, Jee Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

스위칭 주파수의 대역 확산 (Spread Spectrum) 기법은 전력 변환 장치의 전자 방해 잡음 (Electromagnetic Interference; EMI) 을 줄일 수 있다. 하지만 공진형 컨버터는 스위칭 주파수 가변을 통해 출력 전압을 제어하기 때문에 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용하게 되면 출력 전압이 크게 흔들리게 된다. 본 논문은 LLC 공진형 컨버터에 대역 확산 기법을 사용함과 동시에 확산된 스위칭 주파수 대역의 위상 제어를 통해 출력 전압을 제어하는 방법을 제시하고자 한다. 제안하는 출력 전압 제어 성능 향상 및 전자방해잡음 감소 성능은 500 W 프로토타입 컨버터를 사용하여 검증하고자 한다.

1. 서 론

최근 컴퓨터, TV 등의 다양한 전자제품을 제조하는 산업계에서 심미성과 더불어 제작 단가를 낮출 수 있는 제품이 각광받고 있다. 전자 제품을 시장에 출시하기 위해서는 EMI 기준을 만족해야 하며 기존에는 전원 입력 단에 전자방해잡음용 필터를 사용하거나 소프트 스위칭을 통해 전자방해잡음을 저감시켰다. 하지만 기존의 전자방해잡음용 필터는 전력변환장치의 부피와 제작 단가를 크게 증가시키며 소프트 스위칭 방법은 전력변환장치의 토폴로지에 따라 적용 범위가 크게 제한된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 스위칭 주파수에 대한 대역 확산 기법이 제안되었다. 이는 스위칭 주파수를 주어진 패턴에 따라 흔들어 전자방해잡음의 최댓값을 낮추는 기법이다. 그림 1은 스위칭 주파수에 대한 대역 확산 기법의 전자방해잡음 감쇄 원리를 나타낸다.

기존의 스위칭 주파수의 대역 확산 기법은 10 W 미만의 특정 토폴로지에만 국한되었다. continuous conduction mode (CCM) Buck 컨버터 등 출력 전압이 스위칭 주파수에 따라 변동하지 않는 토폴로지에는 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용할 수 있다. 하지만 공진형 컨버터의 경우 주로 스위칭 주파수를 조절하여 출력 전압을 제어하는 pulse frequency modulation (PFM) 방식을 사용한다. 따라서 공진형 컨버터에 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용하게 되면 출력 전압이 크게 흔들리게 된다. 기존의 직렬 공진형 컨버터에 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용한 사례가 있지만 이는 출력 전압 제어를 하지 않는 유도 가열 어플리케이션에 국한된다. 또한 스위칭 주파수를 흔드는 패턴은 사인파, 삼각파,

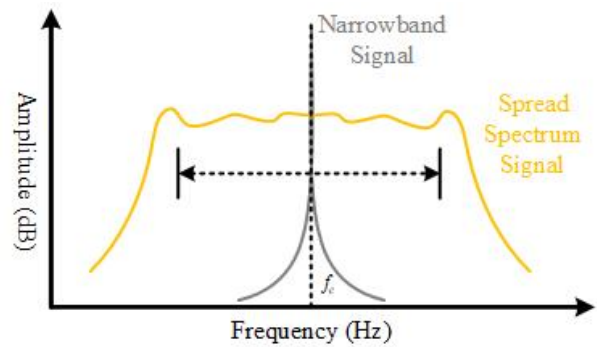


그림 1 스위칭 주파수에 대한 대역 확산 기법을 이용한 전자방해잡음 감쇄 원리

Hershey Kiss 등의 비선형 패턴, 랜덤 변조 패턴 등이 제안되고 있다. 이 때, 삼각파 패턴은 전자방해잡음 저감 성능이 뛰어나고 제어기의 연산량이 낮기 때문에 가장 효과적이다.

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터에 스위칭 주파수에 대한 대역 확산 기법을 적용한다. 또한 스위칭 주파수의 변동에도 일정한 출력 전압을 유지하기 위하여 PFM과 phase shift modulation (PSM)를 결합한 하이브리드 제어 방법을 제안한다. 제안하는 하이브리드 제어 방법은 PFM을 통해 출력 전압을 제어하고 PSM을 통해 스위칭 주파수의 대역 확산 기법으로 인해 발생하는 출력 전압 리플을 감쇄한다. 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용한 LLC 공진형 컨버터와 하이브리드 제어 방법은 500 W 프로토타입 컨버터를 사용하여 검증한다.

2. 본 론

2.1 스위칭 주파수의 대역 확산 기법과 전자방해잡음의 감소

시간에 따른 스위칭 주파수의 대역 확산 기법에 따른 스위칭 주파수의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = A_o \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi \Delta f \int_{-\infty}^t \xi(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

이 때, $s(t)$ 는 시간에 따른 스위칭 파형, A_o 는 스위칭 주파수의 진폭, f_c 는 캐리어 주파수, Δf 는 스위칭 주파수의 변동 폭, $\xi(\tau)$ 는 스위칭 주파수의 변동 패턴을 나타낸다. 스위칭 주파수의 변동 패턴은 변동 모양, 변동 주파수 f_m 을 포함한다. $s(t)$ 의

총 에너지는 $A_0^2/2$ 로 일정한데 비해 스위칭 주파수의 대역 확산을 통해 주파수 범위를 확장함으로써 파워 스펙트럼 밀도 상의 최댓값이 줄어들게 된다. 따라서 스위칭으로 인한 전자방해 잡음의 최댓값 또한 감소하게 된다. 스위칭 주파수의 대역 확산 기법의 선행 연구에 따르면 스위칭 주파수의 변동폭 Δf 가 클수록, 스위칭 주파수를 변동하는 속도가 빠를수록 전자방해 잡음의 최댓값이 감소하게 된다.^[1]

2.2 전자방해잡음 감쇄를 위한 제어 알고리즘

그림 2는 제안하는 LLC 공진형 컨버터를 나타낸다. 1차 측의 고주파 인버터는 PSM을 적용하기 위해 Full Bridge 인버터 구조를 사용하고, 하이브리드 제어기는 PFM과 PSM을 실행하는 두 개의 제어기로 구성되어 있다. 하이브리드 제어기의 동작은 정상 상태와 과도 상태에 따라 달라진다. 그림 3과 같이 출력 전압 에러가 일정 수준 이상이 되면 제어기가 정상 상태에서 과도 상태로 전환되게 된다. 과도 상태에서 출력 전압 제어 후 출력 전압 에러가 다시 낮아져 0으로 수렴하게 되면 제어기는 정상 상태의 동작을 수행하게 된다.

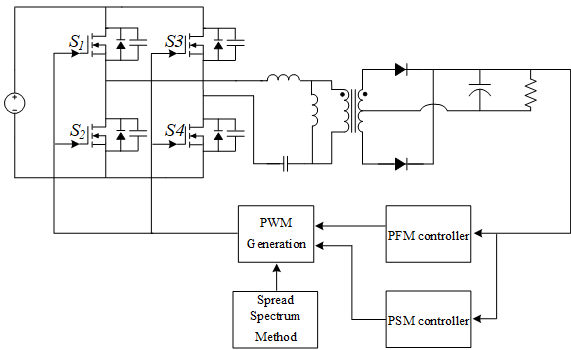


그림 2 스위칭 주파수에 대한 대역 확산 기법이 적용된 LLC 공진형 컨버터와 하이브리드 제어 알고리즘

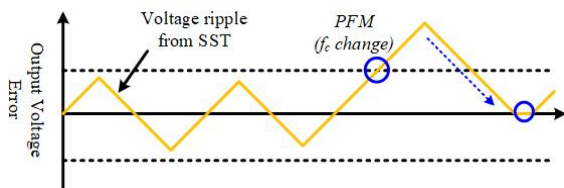


그림 3 하이브리드 제어 알고리즘의 출력 전압 에러에 따른 정상 상태와 과도 상태 분류

정상 상태의 하이브리드 제어기는 스위칭 주파수의 대역 확산 기법으로 인한 일정한 패턴의 스위칭 주파수 변동이 있다. 이 때, 스위칭 주파수 변동으로 인한 출력 전압 변동은 1차 측 인버터의 PSM으로 보상하게 된다. 스위칭 주파수 대역 확산 기법의 스위칭 주파수 변동 폭, 변동 주파수에 따른 전자방해 잡음의 최댓값 변화를 분석해보면 스위칭 주파수를 넓고 빠르게 변동시킬수록 정상 상태에서 전자방해잡음의 최댓값이 효과적으로 감소하게 된다. 따라서 하이브리드 제어기의 정상 상태 설계에 따라 전자방해잡음의 최댓값이 달라진다. 과도 상태의 하이브리드 제어기는 부하에 따라 달라지는 출력 전압을 제어하기 위해 PFM을 사용한다. 이 때, PSM은 PFM에 비해 출력 전압이 변동되는 범위가 작기 때문에 PSM을 사용하지 않는다.

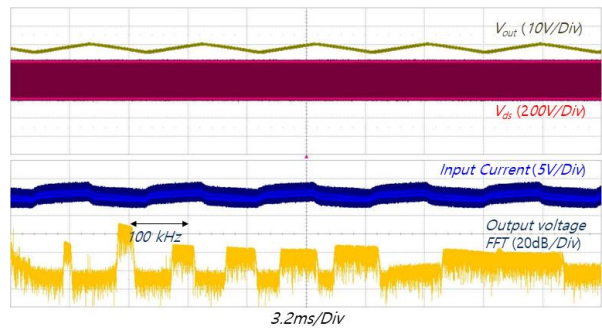
2.3 실험 결과

표 1은 LLC 공진형 컨버터와 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 사용하기 위한 하이브리드 제어기의 설계 결과를 나타낸 표이다. 그림 4는 설계된 LLC 공진형 컨버터와 하이브리드 제어기를 사용한 500 W급 프로토타입의 실험 결과를 나타낸 것이다. 그림 4 (a)는 LLC 공진형 컨버터에 스위칭 주파수의 대역 확산 기법이 적용되었을 때의 실험 결과를 나타낸 것이다. 스위칭 주파수가 삼각과 패턴으로 변동하며 이에 따라 출력 전압이 크게 변동하는 것을 볼 수 있다. 그림 4 (b)는 스위칭 주파수의 대역 확산 기법과 제안하는 하이브리드 제어 알고리즘이 적용된 실험 결과이다. 스위칭 주파수가 삼각과 패턴으로 변동함에도 불구하고 출력 전압 리플이 낮다.

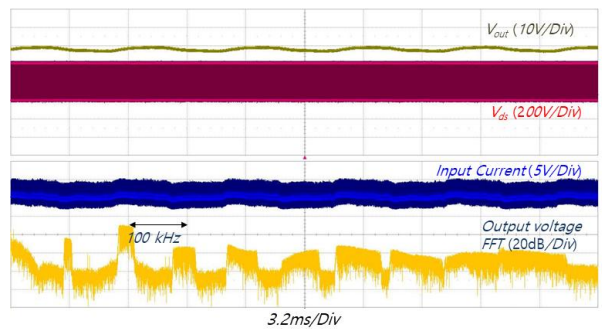
그림 5는 LLC 공진형 컨버터의 전자방해잡음 측정 결과를 나타내었다. 일반적인 LLC 공진형 컨버터의 전자방해잡음 측정 결과는 스위칭 주파수 주변에서 최댓값이 매우 높다. 이에 반해 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 사용한 경우 그 최댓값이 매우 낮아지며 이는 common mode (CM)과 differential mode (DM)에서 모두 공통된 양상을 보인다.

표 1 LLC 공진형 컨버터와 하이브리드 제어기 설계
Table 1 Design of LLC resonant converter and hybrid controller

Resonant capacitor	30 nF	Carrier frequency f_c	100 kHz
Series inductance	70 uH	Δf	7 kHz
Magnetizing inductance	290 uH	f_m	80 Hz

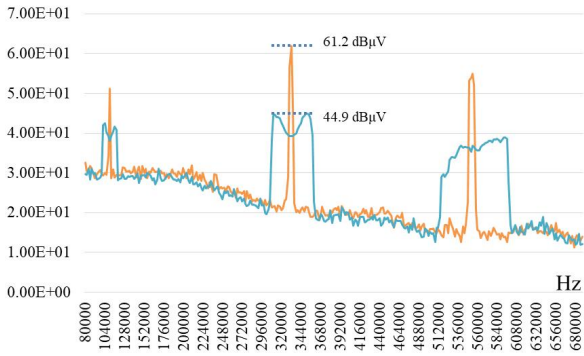


(a)

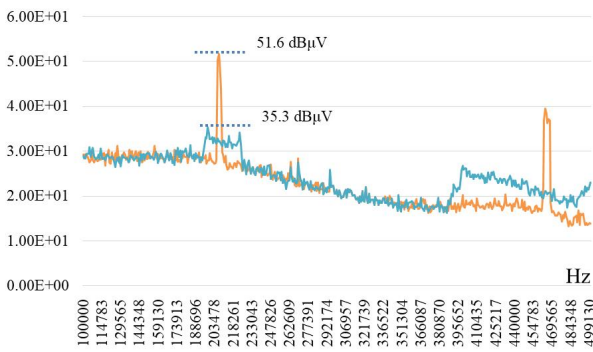


(b)

그림 4 LLC 공진형 컨버터 프로토타입의 실험 결과



(a)



(b)

그림 5 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 통해 감소된 전자 방해잡음 측정 결과: (a) CM noise, (b) DM noise.

2.4 공진형 컨버터와 스위칭 주파수의 대역 확산 기법의 개발 계획

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터에 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용하였다. 정상 상태에서는 스위칭 주파수가 일정한 패턴으로 변동할 때 출력 전압의 리플을 감소하기 위하여 PSM을 사용하였다. 하지만 과도 상태에서는 부하에 따라 변동하는 출력 전압을 제어하기 위하여 스위칭 주파수를 가변하는 PFM이 사용된다. 따라서 과도 상태에서는 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 사용할 수 없으며 따라서 과도 상태일 때 전자 방해잡음의 최댓값이 치솟는 현상이 있다.

이를 극복하기 위해서는 컨버터의 제어 변인을 2개 이상 가져가는 것이 유리하다. 스위칭 주파수는 대역 확산 기법을 사용하여 일정 패턴으로 변동 시키되 출력 전압을 제어할 수 있는 제어 변인이 필요하다. Current fed LLC 공진형 컨버터를 사용하게 되면 스위칭 주파수와 duty cycle이 출력 전압을 독립적으로 제어한다.^[2] 따라서 과도 상태에서도 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 사용할 수 있다. 향후 current fed LLC 공진형 컨버터를 사용하여 과도 상태에서도 동작하는 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 제안할 계획이다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력변환장치의 전자방해잡음을 효과적으로 감소시킬 수 있는 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 LLC 공진형 컨버터에 적용하였다. LLC를 비롯한 공진형 컨버터는

스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 사용하게 되면 출력 전압이 스위칭 주파수에 따라 민감하게 변동하기 때문에 출력 전압 리플이 매우 증가하게 된다. 이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 PFM와 PSM을 모두 적용한 하이브리드 제어 알고리즘을 제안하였다. 500 W 급 프로토타입의 실험 결과를 통해 LLC 공진형 컨버터에 스위칭 주파수의 대역 확산 기법을 적용하여 전자방해잡음이 감소하는 것을 보였고 제안하는 하이브리드 제어 알고리즘을 통해 스위칭 주파수의 대역 확산 기법으로 인한 출력 전압 리플을 효과적으로 감소하였음을 보였다.

이 논문은 2017년 동서발전 연구비(해수전지)를 이용한 파일럿급 ESS 설비구축 원천기술개발 및 시험)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] F. Pareschi, G. Setti, R. Rovatti and G. Frattini, "Practical Optimization of EMI Reduction in Spread Spectrum Clock Generators With Application to Switching DC/DC Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4646-4657, Sept. 2014.
- [2] X. Sun, Y. Shen, Y. Zhu and X. Guo, "Interleaved Boost Integrated LLC Resonant Converter With Fixed Frequency PWM Control for Renewable Energy Generation Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 4312-4326, Aug. 2015.