

주파수-시비율-가변형 이중 출력 LLC 공진형 컨버터의 포락선 모델

이아라, 조상호, 한수영, 박재성, 김셋별, 홍성수
 국민대학교 전력전자 연구소

Envelope Model of Frequency-Duty-Controlled Dual Output LLC Resonant Converter

Ah Ra Lee, Sang Ho Cho, Soo Young Han, Jae Sung Park, Sait Byul Kim, Sung Soo Hong
 Kookmin University Power Electronic Center

ABSTRACT

본 논문에서는 페이저 변환을 통한 주파수 시비율 가변형 이중 출력 LLC 공진형 컨버터의 포락선 모델을 제시한다. 이를 이용하면 제안 회로의 대신호 및 소신호 특성을 쉽게 파악할 수 있을 뿐 아니라, 전달 함수의 정확한 수학적 해석을 통해 보상기의 설계가 용이해지는 장점이 있다.

1. 서론

중용량급 전원 장치에 매우 적합한 LLC 공진형 컨버터는 전 부하에서의 영전압 스위칭(ZVS) 보장과 낮은 스위칭 손실 등의 이점으로 많이 이용된다. 이러한 LLC 공진형 컨버터의 동작 이해와 최적의 제어를 설계하기 위해서는 대신호 및 소신호 특성 해석이 필수적이다. 이를 위해 페이저 변환을 이용한 LLC 공진형 컨버터의 포락선 모델을 제시하고, 이를 통해 대신호 및 소신호 특성을 파악할 수 있었다^[1]. 이 LLC 공진형 컨버터를 이용한 이중 출력 LLC 공진형 컨버터가 다음 그림 1과 같이 제안되었다. 1차 측 스위치 M₁과 M₂의 주파수 및 시비율의 가변을 통해 이중 출력 전압을 독립적이고 정밀하게 제어하는 것을 특징으로 한다^[2].

따라서 본 논문에서는 페이저 변환을 이용하여 제안 회로의 포락선 모델을 제시하고, 포락선 모델의 수학적 해석 및 모의 실험 검증을 통해 최종적으로 이중 출력 LLC 공진형 컨버터의 대신호 및 소신호 특성을 파악한다.

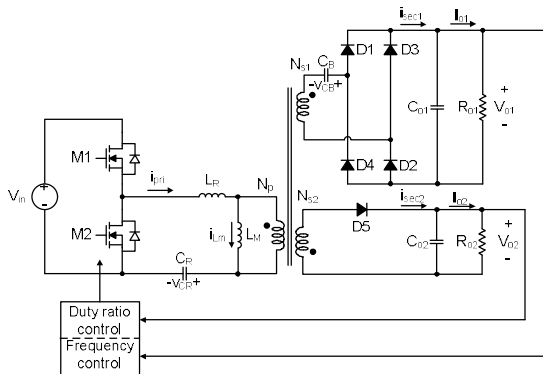


그림 1. 주파수·시비율 가변형 이중 출력 LLC 공진형 컨버터

2. 페이저 변환을 통한 포락선 모델

일반적인 주파수 변조 신호 $x(t)$ 는 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이러한 신호에 대해 페이저 변환을 실시하면 아래 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = A \cos(\omega_s t + \int \omega_s(t) dt) \quad (1)$$

$$x(t) = \text{Re}[\bar{x}(t) \cdot e^{j\int \omega_s(t) dt}] \quad (2)$$

여기에서 $\bar{x}(t)$ 는 $x(t)$ 의 시변 페이저를 나타내며, $\omega_s(t)$ 는 시변 순시 주파수를 의미한다.

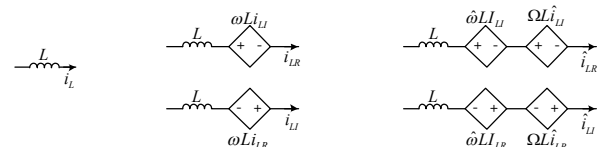
식 (2)를 식 (3)에 나타낸 인덕터의 v i 식에 대입하면 식(4)와 같이 인덕터에 대한 대신호 페이저식을 유도할 수 있으며, 대신호 페이저식에 대한 섭동 및 선형화 과정을 통해 식 (5)와 같이 소신호 페이저식을 유도할 수 있다.

$$L \frac{di(t)}{dt} = v(t) \quad (3)$$

$$L \frac{d\bar{i}(t)}{dt} + j\omega_s(t)L\bar{i}(t) = \bar{v}(t) \quad (4)$$

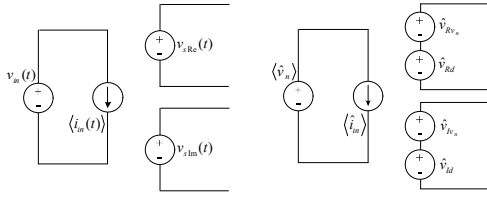
$$L \frac{d\bar{i}}{dt} + j\Omega_s L\bar{i} + j\omega_s L\bar{i} = \hat{v} \quad (5)$$

최종적으로 위의 식 (4), (5)에 나타낸 인덕터의 대신호 및 소신호 페이저 식을 실수부 및 허수부로 나누어 나타내면, 아래 그림 2와 같이 인덕터에 대한 대신호 및 소신호 포락선 모델로 나타낼 수 있다. 동일한 방법으로 캐패시터 및 저항에 대해서도 대신호 및 소신호 포락선 모델을 유도할 수 있다. 또한 제안 회로의 스위칭단 및 정류단의 대신호 및 소신호 포락선 모델을 유도하여 아래 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다^[1].



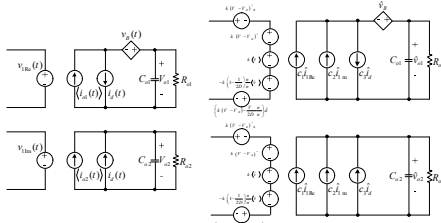
(a) 인덕터 (b) 대신호 포락선 모델 (c) 소신호 포락선 모델

그림 2. 인덕터의 대신호 및 소신호 포락선 모델



(a) 대신호 포락선 모델 (b) 소신호 포락선 모델

그림 3. 스위칭단의 대신호 및 소신호 포락선 모델



(a) 대신호 포락선 모델 (b) 소신호 포락선 모델

그림 4. 정류단의 대신호 및 소신호 포락선 모델

3. 제안 회로의 대신호 및 소신호 포락선 모델

3.1 제안 회로의 대신호 포락선 모델링

2장에서 유도한 기본 소자, 스위칭단, 정류단의 대신호 포락선 모델을 바탕으로 아래 그림 5와 같이 제안 회로의 대신호 포락선 모델을 나타내었다.

3.2 제안 회로의 소신호 포락선 모델링

마찬가지로 2장에서 유도한 기본 소자, 스위칭단, 정류단의 소신호 포락선 모델을 바탕으로 아래 그림 6과 같이 제안 회로의 소신호 포락선 모델을 나타내었다.

또한 그림 6과 같은 비선형 모델을 선형화하기 위하여 제안 회로의 소신호 포락선 모델을 식 (6)과 같은 상태 공간 방정식으로 나타낼 수 있으며, 최종적으로 식 (6)에 대한 출력 전압 V_{o1} 과 V_{o2} 의 전달 함수는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + [B_v B_d B_w]u, \hat{y} = C\hat{x} \quad (6)$$

$$G_{v_{o1}w}(s) = \frac{v_{o1}(s)}{w(s)} = C_{v_{o1}}(sI - A)^{-1}B_w, G_{v_{o2}w}(s) = \frac{v_{o2}(s)}{w(s)} = C_{v_{o2}}(sI - A)^{-1}B_w \quad (7)$$

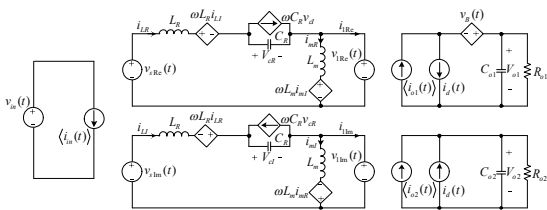


그림 5. 제안 회로의 대신호 포락선 모델

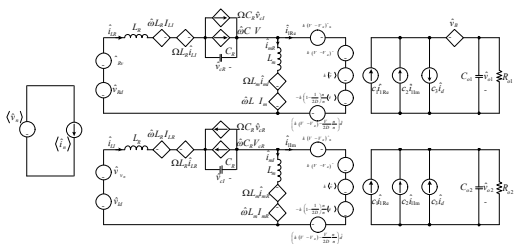
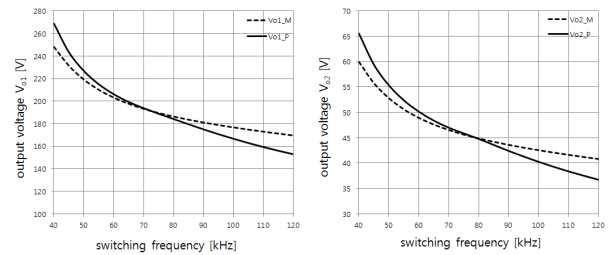


그림 6. 제안 회로의 소신호 포락선 모델

4. 모의실험을 통한 포락선 모델의 검증

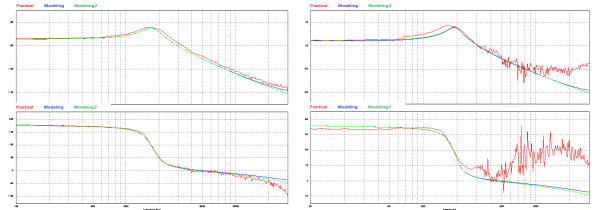
그림 5에 나타난 제안 회로의 대신호 포락선 모델을 PSIM 모의실험으로 구현하였고, 1차측 스위치 M_1 의 시비율이 0.5인 경우의 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실제 회로의 대신호 특성($V_{o1,P}$, $V_{o2,P}$)과 제시된 대신호 포락선 모델의 대신호 특성($V_{o1,M}$, $V_{o2,M}$)이 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, PSIM 모의실험을 이용하여 실제 회로와 식 (7)에 나타난 포락선 모델의 소신호 특성을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실제 회로와 제시된 포락선 모델의 소신호 특성이 거의 일치함을 알 수 있어 본 논문에서 제시한 소신호 포락선 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.



(a) 출력 전압 V_{o1}

(b) 출력 전압 V_{o2}

그림 7. 출력 전압 V_{o1} 과 V_{o2} 의 대신호 전달 함수



(a) 출력 전압 V_{o1}

(b) 출력 전압 V_{o2}

그림 8. 출력 전압 V_{o1} 과 V_{o2} 의 소신호 전달 함수

5. 결론

본 논문에서는 페이지 변환을 통해 제안 회로의 포락선 모델을 제시하고, 이를 이용하여 제안 회로의 대신호 및 소신호 특성을 해석하였다. 포락선 모델의 수학적 해석을 통해 제안 회로의 전달 함수를 얻을 수 있었고, 이를 이용하면 제안 회로의 물리적 특성을 쉽게 파악하고, 전원 회로의 보상기 설계를 보다 용이하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 지식경제부 및 정보통신 연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NPA 2012 H0301 12 2007)

참고 문헌

[1] J. Tian, J. Petzoldt, T. Reimann, M. Scherf, and G. Berger, "Envelope Model of Frequency Duty Controlled LLC Converters", in Proc. PESC, pp.876-881, June 2007.
 [2] 윤종규, 조상호, 노정욱, 홍성수, 김종해, 이효범, 한상규, "단일 제어 IC를 사용한 새로운 이중출력 LLC 공진형 DC/DC 컨버터", 전력전자학회논문지, 제 13권 제 6호, pp. 453-460, 2008.12.