

# 2차측 누설 인덕턴스를 고려한 고주파 LLC 공진형 컨버터의 최적 설계

박화평, 김민아, 정지훈  
울산과학기술원 (유니스트)

## Optimal Design of LLC Resonant Converter with Secondary Leakage Inductance

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

### ABSTRACT

MHz 이상의 높은 공진 주파수를 가지는 LLC 공진형 컨버터는 공진 소자의 크기가 줄어 높은 전력 밀도를 구현 가능하다. 하지만 2차측 누설 인덕턴스가 공진에 크게 영향을 미쳐 기존의 디자인 방법에 오차가 커지고 이는 효율 감소로 이어진다. 본 논문은 이를 극복하기 위해 2차측 누설 인덕턴스를 고려한 컨버터 모델을 제시하고 이의 전압 이득을 분석한다. 제안하는 모델을 사용하여 높은 효율을 위한 변압기의 자화 인덕턴스, 턴 비를 제시하고, 안정적인 컨버터 동작을 위해 2차측 다이오드 디자인 방법을 제안한다. 모든 제안하는 분석 및 디자인 방법은 1 MHz 스위칭 주파수를 가지는 240 W LLC 공진형 컨버터를 통해 검증하였다.

### 1. 서론

최근 산업계의 다양한 분야에서 제품의 크기를 줄이기 위해 높은 전력 밀도를 갖는 전력 변환 장치를 요구한다<sup>[1]</sup>. 이와 같은 요구 사항을 만족하기 위한 방법으로 높은 동작 주파수를 사용하여 수동 소자의 크기를 줄이는 방법이 사용된다. LLC 공진형 컨버터는 단순한 동작 구조, 높은 전력 변환 효율, 저렴한 비용을 가져 고주파 동작에 유리하다. 하지만 스위칭 주파수 증가에 따라 기존 공진 소자 값이 줄어 기생 소자에 의한 공진 주파수 및 전압 이득 변동이 커진다. 특히 2차측 누설 인덕턴스에 의해 전압 이득의 변동이 커지고 이는 기존의 영 전압 스위칭 및 낮은 누설 전류를 위한 자화 인덕턴스 디자인, 영 전류 스위칭을 위한 변압기의 턴 비, 2차측 다이오드의 역방향 전압 선정에 큰 오차를 만든다. 그러므로 이를 고려하지 않은 설계는 높은 스위칭 손실, 도통 손실, 누설 전류, 2차측 다이오드의 고장을 야기한다.

본 논문은 2 차측 누설 인덕턴스를 고려한 컨버터 모델을 제안하고 이의 전압 이득 분석을 통해 기존의 자화 인덕턴스, 변압기 턴 비, 다이오드 설계 대비 높은 효율을 가지는 디자인 방법을 제안한다.

## 2. 2차측 누설 인덕턴스를 고려한 LLC 공진형 컨버터 분석 및 설계

### 2.1 전압 이득 분석

제안하는 LLC 공진형 컨버터 모델은 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며 전압 이득은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 이

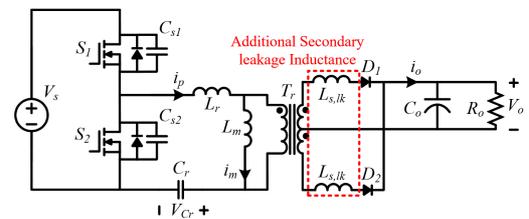


그림 1 2차측 누설 인덕턴스를 고려한 LLC 공진형 컨버터 모델

Fig. 1 Scheme of LLC resonant converter with additional secondary leakage inductance

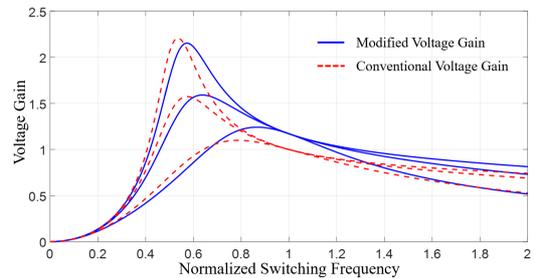


그림 2 기존 모델과 제안하는 모델의 전압 이득 차이 분석

Fig. 2 Voltage gain difference between modified and conventional converter model

용하면 기존 컨버터 모델 대비 제안하는 모델의 전압 이득이 공진 주파수에 높음을 그림 2에서 볼 수 있다. 뿐만 아니라 전압 이득이 동작 주파수가 증가함에 따라 이득이 증가함을 그림 3과 같이 볼 수 있다. 따라서 스위칭 주파수가 증가함에 따라 전압 이득의 변동이 커짐을 볼 수 있고 이는 설계오차에 의한 효율 감소로 이어진다.

$$M_{\text{mod}}(f_n) = \left| \frac{f_n^2 C_r R_{\text{eq}} \omega_r}{j f_n^3 (1 + \beta) \omega_r^2 + f_n^2 C_r R_{\text{eq}} (1 + \lambda) \omega_r - j f_n (1 + \beta) \omega_r^2 - R_{\text{eq}} \omega_r^3 L_m^{-1}} \right| \quad (1)$$

## 2.2 컨버터 디자인 고려사항

### 2.2.1 변압기 턴 비 디자인

LLC 공진형 컨버터는 2차측 다이오드의 영전류 스위칭을 구현하기 위해 공진주파수보다 낮은 스위칭 주파수에서 동작시켜야 한다. 기존에는 변압기의 1차 턴 수를 조정하여 영전류 제어를 구현할 수 있다. 하지만 스위칭 주파수의 증가에 따라 전압이득이 증가하여 턴 수를 크게 조정하여야 영전류 스위칭을 구현할 수 있다. 높은 턴 수의 변압기는 AC 저항 성분을 높여 도통 손실을 증가 시킬 뿐만 아니라 전압 이득이 필요이

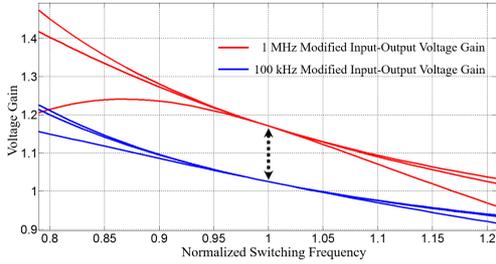


그림 3 주파수에 따른 전압 이득 분석  
Fig. 3 Comparison of modified voltage gain according to the resonant frequency

상으로 커지게 된다. 따라서 적절한 턴 수를 디자인하는 것이 컨버터의 효율을 높이는 데 중요하다. 식 (1)을 사용하여 제안하는 변압기의 턴 비는 식 (2)와 같이 나타난다.

$$n_{\text{mod}} \geq \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{in, \text{max}}}{2(V_o + V_F)} \cdot M_{\text{mod}}(f_{r1, \text{mod}}) \quad (2)$$

## 2.2.2 자화 인덕턴스 디자인

자화 인덕턴스는 1차측 MOSFET에 영전압 스위칭을 구현하는 동시에 작은 순환 전류를 얻기 위해 디자인 된다. 기존의 디자인 방법은 전압 이득 변동을 고려하지 않아 고주파에서 영전압 스위칭을 위해 높은 순환 전류가 발생한다. 식 (4), (5)는 기존의 자화 인덕턴스 및 데드 타임 디자인 방법이고, 식 (1)을 고려한 자화 인덕턴스 및 데드 타임은 식 (6), (7)과 같이 유도된다.

$$t_{dt} \geq \frac{2V_{in} \cdot \max\{C_{S1}, C_{S2}\}}{\max\{|i_p(t_{dt})|\}} = 16C_S f_{s, \text{max}} L_m \quad (4)$$

$$L_m \leq \frac{t_{dt}}{16C_S f_{s, \text{max}}} = \frac{t_{dt}}{16C_S f_r} \quad (5)$$

$$t_{dt, n} \geq \frac{2V_{in} \cdot \max\{C_{S1}, C_{S2}\}}{\max\{|i_p(t_{dt})|\}} = \frac{16C_S f_{r1, \text{mod}} L_m}{M_{\text{mod}}(f_{r1, \text{mod}})} \quad (6)$$

$$L_{m, n} = \frac{M_{\text{mod}}(f_{r1, \text{mod}}) t_{dt, n}}{16f_{r1, \text{mod}} C_{eq}} \quad (7)$$

이는 식 (1)과 같은 전압 이득이 변압기에 유지되면 식 (7)이 스위칭 주파수가 증가함에 따라 식 (5)에 비해 높은 자화 인덕턴스를 가지고 이는 작은 순환 전류가 흐름을 알 수 있다.

## 2.2.3 2차측 다이오드 디자인

스위칭 주파수가 증가함에 따라 2차측 누설 인덕턴스에 걸리는 전압이 증가하여 2차측 다이오드에 역방향으로 걸리는 전압이 증가한다. 뿐만 아니라 2차측 다이오드 내부 캐패시턴스와 누설 인덕턴스가 공진하여 큰 전압 변동을 만든다. 식 (8)은 기존 다이오드에 걸리는 역전압을 나타낸다. 식 (9)는 2차측 누설 인덕턴스에 걸리는 전압을 나타내고 식 (10)은 다이오드 캐패시턴스와 2차측 누설 인덕턴스의 공진에 의해 다이오드에 걸리는 역방향 전압을 나타낸다. 따라서 스위칭 주파수가 증가하면 다이오드 역방향 전압이 증가하게 되고 이를 고려하여 2차측 다이오드를 선정하여야 한다.

$$V_D \cong V_{s, tr} + V_o = 2V_o \quad (8)$$

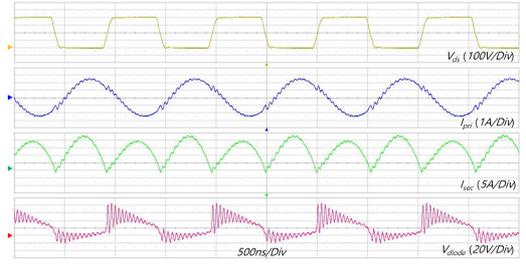


그림 4 주파수에 따른 전압 이득 분석  
Fig. 4 Comparison of modified voltage gain according to the resonant frequency

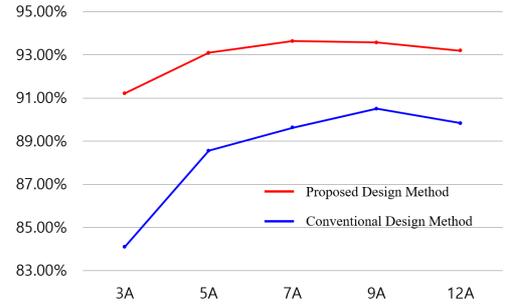


그림 5 전력 변환 효율  
Fig. 5 Power conversion efficiency

$$V_{s, lk, \text{max}} \cong nL_{s, lk} \left[ \left( 1 - \frac{n^2 L_{s, lk}}{n^2 L_{s, lk} + L_m} \right) \cdot C_r \alpha \omega^2 - \frac{nV_o}{n^2 L_{s, lk} + L_m} \right] \quad (9)$$

$$V_{res, \text{max}} = I_{res, \text{max}} \cdot \frac{1}{2\pi f_{res} C_{diode}} = I_{res, \text{max}} X_c \quad (10)$$

## 3. 실험 결과

그림 4는 제안하는 디자인을 사용한 1 MHz의 스위칭 주파수를 가지는 LLC 공진형 컨버터의 실험 결과이다. 이는 1차측 MOSFET의 영전압 스위칭, 2차측 다이오드의 영전류 스위칭을 가짐을 보이고, 기존 디자인 대비 낮은 순환 전류를 가짐을 보인다. 결과적으로 그림 6과 같이 제안하는 디자인 방법이 전부하시 약 3% 높은 전력 변환 효율을 보여준다.

## 4. 결론

본 논문은 스위칭 주파수 증가에 따른 LLC 공진형 컨버터의 디자인 오차를 줄이기 위해 2차측 누설인덕턴스를 고려한 컨버터 모델을 제시하고 이의 전압 이득을 분석하였다. 이를 이용하여 높은 효율 및 안정적 동작을 구현하기 위한 변압기 자화 인덕턴스, 턴 비, 2차측 다이오드의 디자인 방법을 제시하였다. 제안하는 모든 디자인 방법은 1 MHz 스위칭 주파수를 가지는 240 W LLC 공진형 컨버터를 이용하여 검증하였다.

This work was supported by the 2016 Research Fund (1.160004.01) of UNIST(Ulsan National Institute of Science & Technology)

## 참고 문헌

- [1] F. canales, P. Barbosa, C. Aguilar, and F.C. Lee, "A high power density DC/DC converter for high power distributed power systems", Proc. *IEEE PESC*, 2003, pp. 11-18