

# 위상 천이 제어를 이용한 Interleaved LLC 공진형 컨버터의 전류 균등 분배 방법

백중복, 채수용

한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부

## Current Sharing for Interleaved LLC Resonant Converter with Phase-Shift Control

Jongbok Baek and Suyong Chae

Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research

### ABSTRACT

Interleaved 컨버터의 경우 전류 리플을 줄여 출력 필터의 사이즈를 줄이기 위해 많이 사용된다. 하지만 모듈간 소자값의 편차가 발생할 경우 전류 불평형을 초래하게 되며, 이는 리플 저감효과를 감소시키거나 방열문제, 노화축진, 그리고 오동작을 일으킬 가능성을 높이게 한다. 특히 공진형 컨버터의 경우 주파수 제어를 시도하기 때문에 Interleaving 기법을 적용하여 효율성을 얻기에는 제약이 많다. 본 논문에서는 이러한 소자값의 불일치로 인한 전류 불평형 문제를 해결하기 위해 위상천이변조 제어를 제안한다. 동작원리와 시스템에 대한 분석을 제시하고, 모의실험을 통해 타당성을 검증한다.

### 1. 서 론

공진형 컨버터는 전력 변환 장치의 소형화, 고효율에 대한 요구를 만족시키기 위한 좋은 대안 중 하나로서, 이에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 LLC 공진형 컨버터의 경우, 넓은 부하 범위에서 주스위치의 영전압 스위칭, 그리고 정류단의 영전류 스위칭이 가능하기 때문에 높은 주파수에서도 고효율 동작과 노이즈 발생 저감의 이유로 그 응용범위가 확대되고 있는 추세다. 하지만 낮은 전압의 고출력 응용에서는 그 사용이 제한될 수 있다. 이는 정류단의 전류가 불연속 영역에서 동작할 경우 전류의 피크값이 증가하기 때문이다. 출력 전류 리플의 증가는 출력 전압 리플의 증가와 캐패시터의 전류 정격 문제를 초래할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 많은 수의 병렬 연결된 캐패시터를 필요로 하게 된다.

이러한 문제는 기존에 잘 알려진 병렬 컨버터의 인터리빙 기법을 통해 해결 가능하다. 인터리빙 기법은 모듈간 스위칭 동작에 위상차를 두어 전력처리 용량을 키우면서도 전류 리플을 줄임으로써, 더 적은 용량의 출력 필터의 캐패시터로 전압 리플을 줄일 수 있는 방법이다. 하지만 LLC 공진형 컨버터의 인터리빙 방법이 항상 출력 전류 리플을 줄일 수 있는 것은 아니다. 실제로 모듈간 소자의 편차는 전압 이득 특성에 영향을 미치며, 이는 전력 불평형을 가져올 수 있다. 따라서 전력 처리 용량 증가와 더불어 전류 리플 저감이라는 원래의 목적을 달성하기 위해 병렬 연결된 LLC 공진형 컨버터의 경우, 전류 평형을 위한 추가적인 회로 또는 제어 기법이 필수적이다. 또한 LLC 공진형 컨버터의 경우 주파수 가변 제어로 동작하기 때문에 스위칭 주파수의 동기화에 대한 문제가 신중히 고려되어야 한다.

본 논문에서는 다상 풀 브릿지 LLC 공진형 컨버터의 1차 측 스위치의 위상천이를 통해 전류 균등 분배하는 방법을 제안

한다. 제안한 방법의 동작원리를 분석하고, 400 W 의 다상 LLC 공진형 컨버터의 모의실험을 통해 그 타당성을 검증한다.

### 2. Interleaved 풀브릿지 LLC 공진형 컨버터

#### 2.1 동작원리

그림 1은 two-phase interleaved 풀브릿지 LLC 공진형 컨버터를 나타낸다. 각 모듈의 공진탱크는 편차를 갖으며 따라서 공진 주파수 및 전압 이득 특성은 서로 다르게 결정된다. 1차 측 스위치의 경우 서로 동기되어 동일한 스위칭 주파수로 동작한다. 출력 전류에 기반하여 각 레그의 위상차가 발생할 수 있고, 인터리빙을 위해 모듈간의 스위칭 동작 역시 위상차를 가진다.

컨버터의 동작원리를 설명하기 위해 그림 2에 주요파형을 나타내었다. 전압 제어 모드로 동작할 때 모듈 중 특정 스위칭 주파수에서 전압 이득이 차로 부하 불균형이 발생하게 된다.

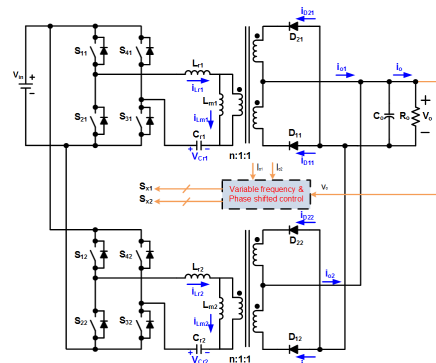


그림 1 다상 인터리빙 풀 브릿지 LLC 공진형 컨버터

Fig. 1 Multi-phase interleaved full-bridge LLC resonant converter

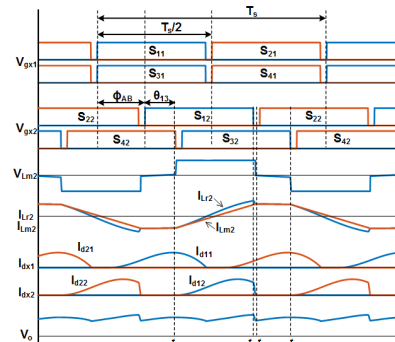


그림 2 주요 동작 파형  
Fig. 2 Key waveforms

이를 조절하기 위해 레그의 위상차를 이용하여 전압 이득을 변경하게 되며, 부하 분담률이 낮은 모듈의 경우는 효율적 동작을 위해 위상차 없이 최대 유효 듀티를 갖도록 동작한다. 위상차가 발생하지 않는 모듈의 경우는 일반적인 LLC 공진형 컨버터의 동작을 따른다. 따라서 레그간 위상차가 발생하는 경우에 대해서만 설명하며 동작은 반주기 동안 대칭적으로 동작한다.  $t_0$ 에서  $t_1$ 구간은  $S_{12}$ 와  $S_{22}$ 가 동시에 도통되는 구간으로  $Lr_2$ 와  $Cr_2$ 가 공진하면서 전력이 출력쪽으로 전달된다. 이 때  $D_{12}$ 가 도통되고 따라서  $Lm_2$ 에는  $nV_o$  전압이 인가되어 전류가 선형적으로 증가한다.

$$I_{LR}(t) = \frac{1}{Z_R} [V_{in} - nV_o - V_{CR}(t_0)] \sin \omega_{R1}(t - t_0) + I_{LR}(t_0) \cos \omega_{R1}(t - t_0), \quad \omega_{R1} = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \quad (1)$$

$t_1$ 에서  $S_{12}$ 가 오프되기 시작하고 dead time 동안  $S_{22}$ 가 ZVS 동작을 하고,  $D_{12}$ 가 오프되면서  $t_2$ 시점에 이르게 된다.

$$I_{LR}(t) = I_{LR}(t_1) \cos \omega_{R2}(t - t_1), \quad \omega_{R2} = \frac{1}{\sqrt{2L_R C_P}} \quad (2)$$

$t_2$ 에서  $t_3$ 동안  $S_{22}$ 와  $S_{22}$ 가 도통되어  $Lr_3$ ,  $Cr_3$ ,  $Lm_2$ 가 직렬 공진하면서 프리휠링하게 된다.

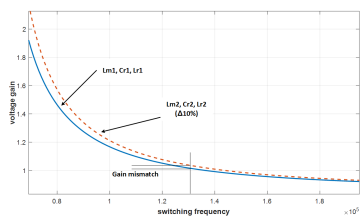
$$I_{LR}(t) = I_{LR}(t_2) \cos \omega_{R3}(t - t_2), \quad \omega_{R3} = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_m) C_r}} \quad (3)$$

실제 동작 조건에 따라 더욱 다양한 모드가 존재한다. 설명한 모드 경우 유효 듀티가 줄어들어 스위칭 주파수가 공진 주파수 보다 올라간 것처럼 보였기 때문에 LLC 컨버터 동작의 above ZVS 영역의 동작과 유사하게 나타난다.

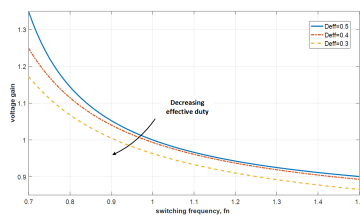
## 2.2 전류 균등 분배 제어

공진탱크의 소자값이 차이가 날 경우 전압 이득 특성이 달라질 수 있으며, 이는 동작 주파수와 부하 분담률에 영향을 미치게 된다. 그림 3.(a)는  $Lm$ 과  $Lr$ 이 10% 차이가 나는 경우를 나타내고 있으며, 동일한 주파수로 동작할 경우 다른 부하조건에서 동작점이 형성되어야 함을 확인할 수 있다. 이는 부하의 불균형을 의미하고, 이를 해결하기 위해 위상 천이 제어가 시도된다. 따라서 그림 3.(b)와 같이 전압이득을 조절하여 동일 주파수에서 동일한 부하량을 처리할 수 있음을 알 수 있다.

그림 4는 제어 블록을 나타내며 전류정보를 바탕으로 각 레그의 위상차를 제어하며 인터리빙을 통한 출력 전압 리플을 최소화하기 위해 모듈간 스위치의 위상차 역시 제어하였다.



(a) 공진탱크 편차에 따른 전압 이득



(b) 유효 듀티 변화에 따른 전압 이득  
그림 3 전압 이득 특성

Fig. 3 Voltage gain characteristic

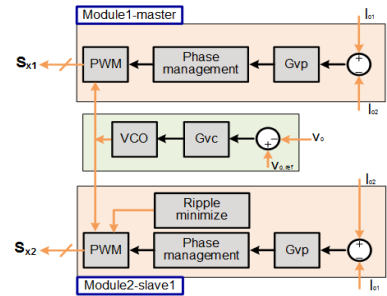
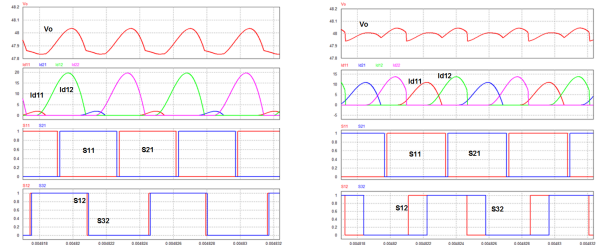


그림 4 제어 블록

Fig. 4 Control block diagram

## 3. 실험 결과

제안한 방법을 검증하기 위해 380V 입력 48V 출력을 갖는 2-phase 풀브릿지 LLC 공진형 컨버터를 모의실험 하였다.  $Lr$ 과  $Lm$ 은 10%의 편차를 갖고 있다. 그림 5는 시험결과를 나타내는 것으로 그림 5.(a)처럼 일반적으로 동작하는 LLC 컨버터의 경우 전류 불균형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5.(b)는 제안한 방법이 적용된 과형으로 모듈간 위상차를 보이며 전류가 균일하게 분배되는 것을 확인할 수 있다. 공진점 및 특성 임피던스의 차이로 인해 각 모듈간 피크 전류는 다르지만 평균전류는 동일하게 분배되고 있다. 따라서 주파수 가변 방식으로 제어가 되는 공진형 컨버터의 경우, 제안한 방법을 통해 동일한 스위칭 주기로 동작하면서 전류 균등 분배가 가능함을 확인하였다. 또한 모듈간 위상 제어를 통해 출력 전압의 리플 역시 최소화 될 수 있음을 검증하였다.



(a) 위상 제어 없는 경우 (b) 위상 제어 포함한 경우

그림 5 풀브릿지 LLC 컨버터 모의 실험

Fig. 5 Simulation waveforms of FB LLC converter

## 4. 결론

본 논문에서는 소자의 편차로 인한 다상 인터리빙 LLC 공진형 컨버터의 전류 불평형 문제를 해결하기 위해 위상 천이 변조를 적용한 제어 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 주파수 가변 제어를 통해 출력 전압을 제어하고, 각 모듈의 출력 전류는 위상 천이를 이용하여 균형을 이루도록 하였다. 제안한 방법의 분석과 48V 출력을 갖는 2-phase LLC 공진형 컨버터의 모의 실험을 통해 그 적절성을 검증하였으며, 다상으로 연결 시 확대 적용 가능하다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20141010502280)

## 참고 문헌

- [1] B. C. Kim, K. B. Park and G. W. Moon, "Analysis and Design of Two-Phase Interleaved LLC Resonant Converter Considering Load Sharing," in *Proc. IEEE ECCE*, 2009, pp. 1141-1144.
- [2] E. Orietti, P. Mattavelli, G. Spiazzi, C. Adragna and G. Gattavari, "Two-Phase Interleaved LLC Resonant Converter With Current-Controlled Inductor," in *Proc. IEEE BPEC*, 2009, pp. 289-304.