

# LLC 공진형 컨버터의 동작 무순단 모드 천이 방법 적용을 통한 최적 효율 제어

이민지, 주동명, 박준성  
한국전자기술연구원 전력제어시스템 연구센터

## Optimal Efficiency Control by Applying The Seamless Mode Transition Method of LLC Resonant Converter

Minji Lee, Dongmyoung Joo, Joon Sung Park  
Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

### ABSTRACT

전기차 급속충전기는 시중 전기차 충전을 위해 200~1000V의 전압을 출력해야 한다. 그러나 LLC 공진형 컨버터는 스위칭 주파수 제어만을 통해 광범위한 출력 전압 제어에 불리하다. 따라서 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 하프 브리지-풀 브리지 모드 천이 방법을 적용하고 효율 개선 및 전류 무순단 모드 천이 특성을 검증한다.

### 1. 서 론

기존 400V 배터리 시스템에서 짧은 주행거리와 긴 충전 시간의 문제를 해결하기 위해 800V 배터리 시스템이 적용된 전기자동차가 출시되고 있다. 따라서 최신 고속 충전기는 400V와 800V의 배터리 정격전압을 가지는 전기자동차에 대응할 수 있도록 200~1000V의 넓은 출력 전압이 요구되고 있다.<sup>[1]</sup>

LLC 공진형 컨버터는 고효율과 고전력 밀도를 모두 달성할 수 있기 때문에 전기자동차용 급속충전기에 많이 사용된다. 그러나 LLC 공진형 컨버터는 주파수 제어만으로 200~1000V의 넓은 출력 전압 범위 대응이 어렵다. 더 낮은 출력 전압 제어를 위해 DC 링크 전압을 낮춰 출력 범위를 확장할 수 있지만 적절한 그리드 전압을 유지해야 하는 필요성에 의해 제한된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 하프브릿지 동작으로 공진 네트워크의 입력 전압을 줄여 낮은 출력 전압을 제어할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 저전압 제어를 위한 하프 브리지-풀 브리지 모드 천이 방법을 적용하고 효율 개선 및 전류 무순단 모드 천이 특성을 30kW급 시작품 시험을 통해 검증한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 하프브릿지-풀브릿지 모드 천이

LLC 공진형 컨버터는 Pulse Frequency Modulation 방법을 통해 공진 네트워크의 임피던스를 조절하여 출력 전압을 제어한다. 그러나 저전압 제어 시, 스위칭 주파수를 증가시켜도 전압 이득 곡선의 변화량이 적어 최소 전압 이득 달성이 어렵다. 따라서 풀 브리지에서 하프 브리지로 모드 천이를 통해 공진 네트워크의 입력 전압을 직접적으로 줄여 낮은 출력 전압 제어가 가능하다.

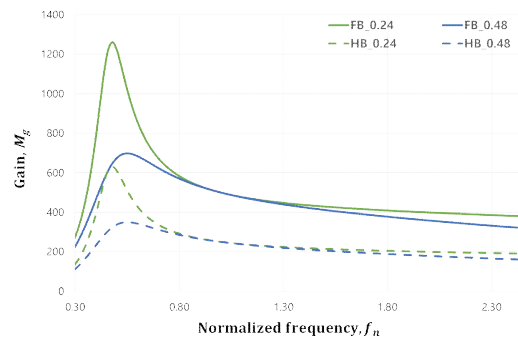


그림 1 동작 모드에 따른 전압 이득 곡선  
Fig. 1 Gain curve by operating mode

식(1)은 FHA 해석 방식을 통해 계산한 LLC 공진형 컨버터의 전압 이득이다. 그림 1은 식(1)을 통해 나타난 전압 이득 곡선으로, 실선의 풀 브릿지 이득 곡선은 스위칭 주파수 제어만으로는 200V의 낮은 출력 전압을 얻는데 한계가 있다. 점선으로 된 곡선은 하프 브리지 동작 시에 나타나는 전압 이득 곡선이다. 동일 스위칭 동작 영역에서 하프 브리지 동작을 하게 되면, 풀 브릿지 동작 모드일 때 보다 절반의 전압 이득을 가지므로 저전압 제어에 유리하다. 따라서 낮은 전압 이득 조건에서는 하프 브리지 모드, 상대적으로 높은 전압 이득 조건에서는 풀 브리지 모드 동작을 결합한 하이브리드 운전으로 더 높은 효율을 가질 수 있다.

$$M_g = \frac{F_x^2(m-1)}{\sqrt{(mF_x^2-1)^2 + F_x^2(F_x^2-1)^2(m-1)^2Q^2}} \quad (1)$$

$$\left( Q = \frac{1}{R_{ac}} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} \frac{N_p^2}{N_s^2} R_o, F_x = \frac{f_s}{f_r}, \right. \\ \left. f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}}, m = \frac{L_r + L_m}{L_r} \right)$$

#### 2.2 모드 천이 알고리즘

그림 2는 설계한 LLC 공진형 컨버터의 동작 영역을 나타내며, 동작 모드 전환 스위칭 주파수( $f_{trans}$ )를 기준으로 하프브리지와 풀브리지 모드로 나눌 수 있다. 넓은 출력 전압 제어를 위해  $f_{trans}$ 를 97kHz로 설정하고 이를 기준으로 스위칭 주파수

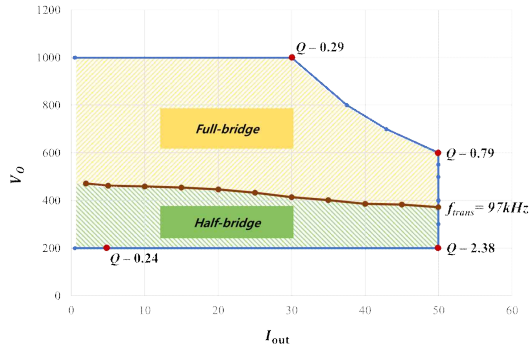


그림 2 LLC 공진형 컨버터의 동작 영역  
Fig. 2 Operating area of LLC resonant converter

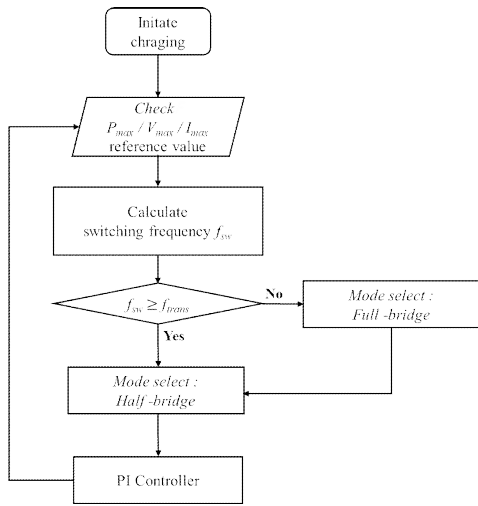


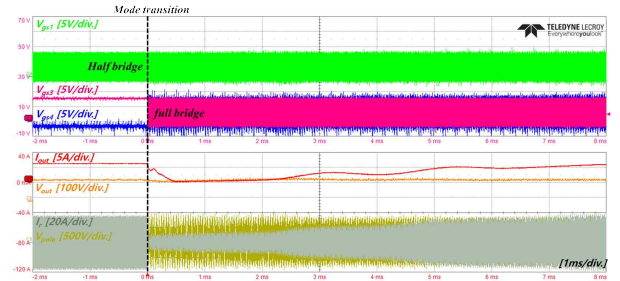
그림 3 모드 천이 방법을 적용한 제어 블록도  
Fig. 3 Flowchart with mode transition method

( $f_{sw}$ )에 따라  $f_{sw}$ 가  $f_{trans}$  보다 크면 하프 브리지 모드,  $f_{sw}$ 가  $f_{trans}$  보다 작으면 풀 브리지 모드로 천이한다.

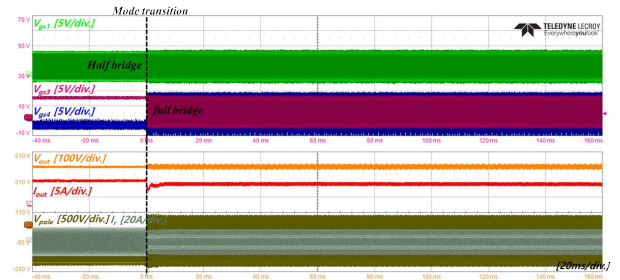
그림 3은 모드 천이 방법을 적용한 LLC 공진형 컨버터의 제어 블록도이다. 충전 시작 후, 레퍼런스 값에 따라 스위칭 주파수를 계산하고 동작 모드를 선택한다. 초기 스위칭 주파수 210kHz에서  $f_{sw}$ 를 감소시켜 출력 전압을 높이고, 동작 스위칭 주파수 내에서 계속되는 출력 전압과 레퍼런스 전압을 비교하여 PI 제어기에서 동작 가능한 스위칭 주파수를 출력한다. 이때 PI 제어기 레퍼런스 전압이 하프 브리지 모드의 최대 출력 전압보다 높으면,  $f_{trans}$  도달하기 전까지 하프 브리지 모드로 동작하고,  $f_{trans}$  도달하면 풀 브리지 모드로 천이해 동작한다.

### 3. 실험 결과

저전압 제어 영역에서 제안한 방법을 적용하고 효율 개선 및 전류 무순단 모드 천이 특성을 검증하기 위해 30kW급 시작품을 제작하고 실험을 진행하였다. 그림 4는 하프 브리지-풀 브리지 모드 천이 실험 파형이다. 그림 4(a)에서 모드 천이 구간은 약 8ms이다. 그림 4(b)는 약 6ms로 그림 4(a)보다 짧으며 전류 무순단 천이 특성을 가진다. 그림 5는 동작 모드에 따른 효율을 나타낸다. 입력전압 700V, 8A 부하에서 300V 출력을 제어할 때, 하프 브리지 동작 모드에서 풀 브리지 동작 모드 보다 약 8.2% 더 높은 97.97%의 효율을 보였다.



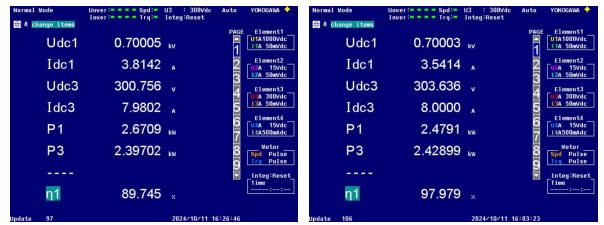
(a) 모드 천이 구간 : 8ms



(b) 모드 천이 구간 : 6ms

그림 4 모드 천이 실험 파형

Fig. 4 Experiment waveform of mode transition



(a) 풀 브리지 동작 모드

(b) 하프 브리지 동작 모드

그림 5 동작 모드에 따른 효율 비교

Fig. 5 Efficiency comparison according to operating mode

### 4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 하프 브리지-풀 브리지 모드 천이 방법을 적용하고 효율 개선 및 전류 무순단 모드 천이 특성을 30kW급 시작품 시험을 통해 검증하였다. 연속적인 전류제어로 과도 상태 없이 모드 전환이 이루어 지는 것을 확인하였다. 또한, 하프 브리지 동작이 풀 브리지 동작 모드 보다 더 우수한 효율 특성을 나타낸다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00404313 모바일 기기 충전 아답터용 650 V GaN 기반 통합 컨버터 단일 IC 개발)

### 참고 문헌

[1] 이기영, 민성수, 박수성, 조영찬, 이상택, 김래영, "전기자동차 급속충전기용 넓은 전압 범위를 갖는 30kW급 SiC MOSFET 기반 고속 스위칭 LLC 컨버터 설계 및 병렬 운전", 전력전자학회논문지, Vol. 27, No. 2, pp. 165-173, 2022, April.