

직렬 출력단 구조를 갖는 공진형 컨버터의 출력 전압 밸런싱 제어 방법

박원우, 박상민, 주동명, 노용수, 현병조, 박준성
한국전자기술연구원 전력제어시스템 연구센터

An Output Voltage Balancing Method for an Output-Series LLC Resonant Converter

Won Woo Park, Sang Min Park, Young-Su Noh, Dongmyoung Joo, Byong Jo Hyon, Joon Sung Park

Power Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

최신 전기자동차 급속충전용 파워 모듈은 30kW의 대출력 및 200-1000Vdc의 넓은 출력 전압 범위를 요구한다. 이를 달성하기 위해 자성체를 직/병렬 구조로 구성할 수 있으나, 수동소자 공차에 의한 출력전압 불균형이 발생한다. 본 논문에서는 전압불균형을 해결할 수 있는 주파수 및 듀티 제어 방법을 제안하고 시험을 통해 각 제어 방법의 성능을 검증한다.

1. 서 론

최근 E-mobility 분야에서는 다양한 전압 범위를 갖는 배터리가 사용되고 있다. 이에 따라 충전 시스템은 다양한 배터리를 충전할 수 있도록 넓은 출력 전압 제어 범위를 만족해야 한다^{[1][2]}. LLC 공진형 컨버터는 전 부하 영역에서 영전압 스위칭이 가능한 장점이 있으나, 단일 모듈로 설계하는 경우 넓은 출력 전압 범위 대응 및 자성체 및 전력반도체 스위칭등 방열 문제가 발생할 수 있으므로 그림 1과 같이 분리하여 설계하는 것이 더 효과적이다. 그러나 이러한 직렬 구조에서는 L, C 및 변압기의 제작 공차로 인한 출력전압 불균형이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 출력전압 편차를 제거하기 위해 주파수 제어와 듀티 제어 방법을 제안하며 각 제어 방법의 성능을 실험을 통해 검증한다.

2. 출력전압 불균형 제거 방법

2.1 출력 전압 불균형

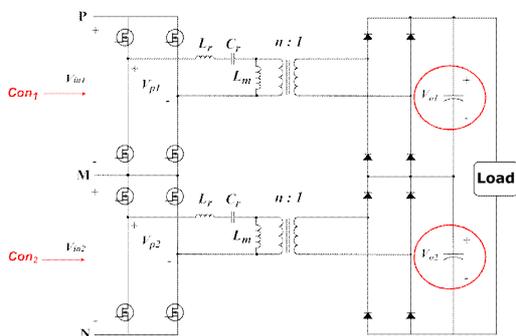


그림 1 직렬 출력단 구조를 갖는 LLC 컨버터 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of output-series LLC resonant converter

그림 1의 위상 컨버터(Con1) 및 아랫상 컨버터(Con2)를 동일한 스위칭 주파수로 동작시키면 최종 출력 전압은 지령 출력 전압에 도달할 수 있다. 그러나 수동소자의 제작 공차로 인해 출력전압 V_{o1} 과 V_{o2} 의 전압 불균형 및 전력 불균형이 발생한다^[3]. 이는 각 브리지간 출력 전류 및 전력의 불평형으로 나타나기 때문에 제어 방법을 통한 해결이 필요하다.

2.2 주파수 제어 방법

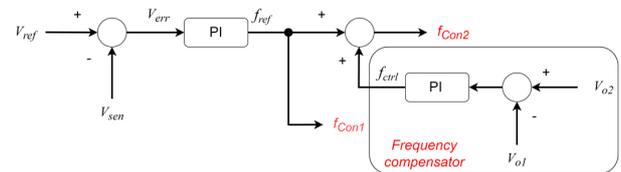


그림 2 출력 전압 주파수 보상기가 적용된 전압 제어기
Fig. 2 Voltage controller with output voltage frequency compensator

주파수 제어 방법에서 Con1의 스위칭 주파수는 전압 제어기의 지령 주파수(f_{ref})를 그대로 사용한다. Con2는 그림 2와 같이 출력전압 불균형 제거를 위해 비례-적분(PI) 제어기를 사용한다. 제어기의 보정 주파수(f_{ctrl})값을 f_{ref} 에 더한 주파수를 Con2의 지령 주파수로 적용하여 전압 불균형을 해결한다. 각 컨버터의 스위칭 주파수 값은 (1), (2)와 같다.

$$f_{con1} = f_{ref} \quad (1)$$

$$f_{con2} = f_{ref} + f_{ctrl} \quad (2)$$

2.3 듀티 제어 방법

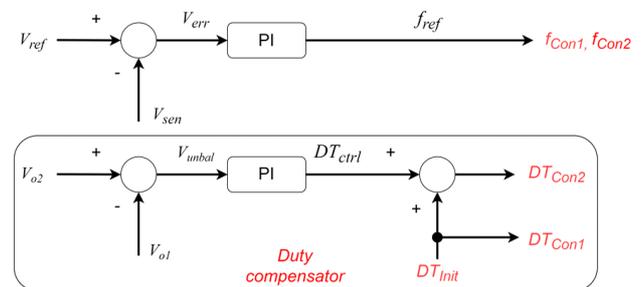


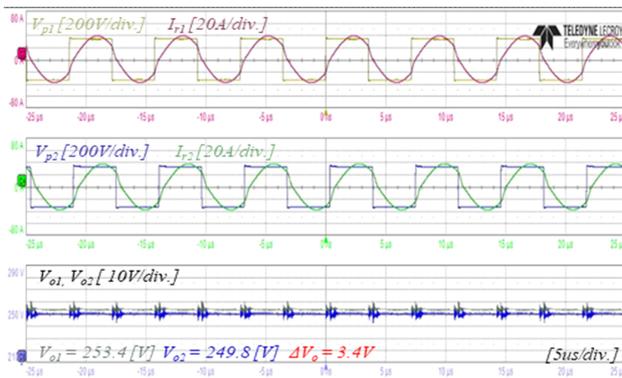
그림 3 출력 전압 듀티 보상기가 적용된 전압 제어기
Fig. 3 Voltage controller with output voltage duty compensator

듀티 제어 방법에서 Con_1 및 Con_2 의 스위칭 주파수는 전압 제어기의 지령 주파수(f_{ref})를 그대로 사용한다. Con_1 의 데드타임 DT_{con1} 은 하드웨어 설계시 설정한 데드타임 값을 적용한다. Con_2 의 데드타임 DT_{con2} 는 그림 3과 같이 출력전압 불균형 제거를 위해 비례-적분(PI) 제어기의 출력값을 사용한다. 제어기의 보정 데드타임(DT_{ctrl})값을 DT_{mit} 에 더한 데드타임을 DT_{con2} 의 지령 데드타임으로 적용하며, 결론적으로 Con_2 의 듀티를 줄여 전압 불균형을 해결한다. 위상 및 아랫상 컨버터의 데드타임은 (3), (4)와 같다.

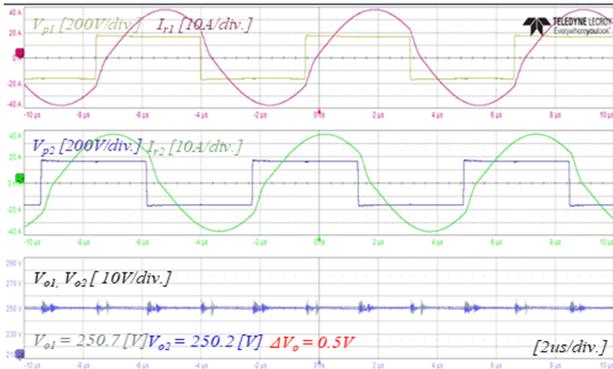
$$DT_{con1} = DT_{mit} \quad (3)$$

$$DT_{con2} = DT_{mit} + DT_{ctrl} \quad (4)$$

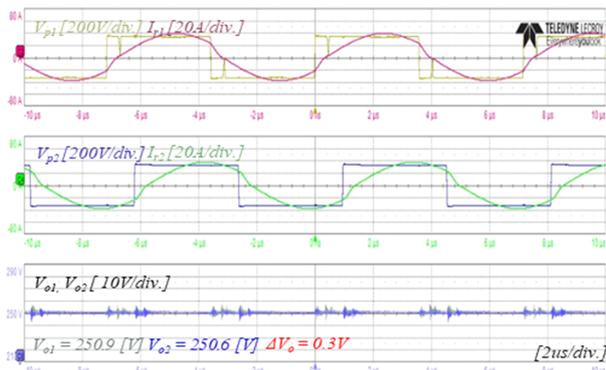
3. 실험 결과



(a) 기존 제어 방법



(b) 주파수 제어 방법



(c) 듀티 제어 방법

그림 4 각 제어 방법별 주요 파형 비교 (500V/30A 출력 조건)
Fig. 4 Key waveform comparison of each compensation method

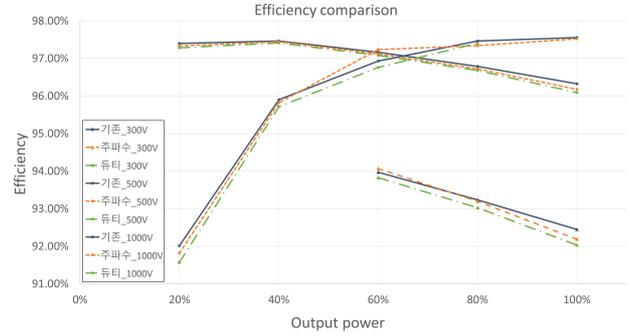


그림 5 각 동작 영역 별 효율 비교

Fig. 5 Efficiency comparison at each operating area

제한한 주파수 및 듀티 제어 방법을 검증하기 위해 15kW급 LLC 컨버터 시제품 제작하고, LLC 컨버터의 승압 및 강압 구간에서 제안한 제어기의 효과를 확인하기 위해 1000/500/300V의 세가지 동작 영역에서 실험을 수행하였다. 그림 4는 500V/30A 출력 조건에서 각 제어 방법의 파형을 나타낸다. 일반적인 주파수 제어기를 적용한 그림 4-(a)는 출력 전압의 불균형이 발생한다. 반면 각각 주파수 및 듀티 제어기를 적용한 그림 4-(b) 및 (c)는 출력 전압 불균형이 해소된 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 3가지 제어 방법의 각 출력 조건에 따른 효율 비교 그래프를 나타낸다. 주파수 제어 방법은 거의 유사한 효율을 나타낸다. 반면 듀티 제어 방법은 영전압 턴온이 되지 않기 때문에 효율이 약간 감소하는 것으로 나타난다.

4. 결론

이 논문에서는 LLC 공진 컨버터를 분리하여 설계시 L, C 및 변압기의 턴비 편차로 인해 불균형한 출력전압이 발생하는 것을 해결하기 위해 주파수 및 듀티 제어 방법을 제안하였다. 두 제어 방법 모두 출력 전압 불균형을 해결이 가능하지만, 효율 비교 시 듀티 제어기는 턴 온시 영전압 스위칭이 되지 않기 때문에 기존 방법 제어에 비해 효율이 감소되는 것으로 나타난다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(20212020800020, 통합형최적설계 플랫폼 기반 초고효율전력변환시스템 개발)

참고 문헌

- [1] 박상범, 이우철, “넓은 범위의 출력 전압을 가지는 Single Stage LLC 공진 컨버터 연구”. 조명·전기설비학회 논문지, vol. 33, no. 11, pp. 36-44, 2019.
- [2] 이지철, 허예창, 마리우스, 주종성, 김은수, “일정 스위칭 주파수에서 넓은 출력전압 제어범위를 갖는 LLC 공진 컨버터”. 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 184-185, 2017.
- [3] J. Zhang, S. Shao, Y. Li, J. Zhang and K. Sheng, “A Voltage Balancing Method for Series-Connected Power Devices in an LLC Resonant Converter”, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 3628-3632, 2021.