

급속충전기 용 LLC 공진형 컨버터의 저전압 경부하 영역 제어 방법 비교

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

Comparison of Control Methods in Low Voltage Light-Load Area of LLC Resonant Converter for a Fast Charger

Minji Lee, Sang Min Park, Dongmyoung Joo, Young-Su Noh, Byong Jo Hyon, Joon Sung Park
Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

전기자동차의 400/800V 배터리 시스템 혼용에 따라 급속충전기 또한 넓은 출력 전압 범위가 요구되고 있다. 그러나 LLC 공진형 컨버터는 저전압 경부하 영역 제어가 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 해당 영역 제어를 위해 듀티 및 위상 제어 방법을 적용하고, 각 제어 방법의 성능을 15kW급 시제품을 통해 검증한다.

1. 서론

전 세계적인 차량 전동화 추세에 따라 전기자동차 시장이 빠르게 성장하고 있다. 하지만 전기자동차는 내연기관 자동차에 비해 충전 시간이 상대적으로 길다. 이를 해결하기 위해 2023년에는 2022년 대비 2배 증가하는 등 전기차를 빠르게 충전할 수 있는 급속충전기의 보급이 확대되고 있다.^[1] 2021년 이후 800V급 배터리 시스템을 탑재한 차량들이 출시되면서 기존 400V 시스템을 포함한 다양한 차량 충전이 가능한 200-1000V의 넓은 출력 범위를 갖는 급속충전기가 요구되고 있다.^[2]

LLC 공진형 컨버터 토폴로지는 교류 계통과 배터리 사이에 전기적 절연이 가능하고 전부하에서 영전압 스위칭이 가능하여 급속충전기에 주로 사용된다. LLC 공진형 컨버터는 스위칭 주파수의 제어를 통해 출력 전압을 제어하지만 스위칭 주파수 제어로는 저전압 및 경부하 영역 제어가 어렵다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 저전압 경부하 영역 제어를 위한 듀티 및 위상 제어 방법을 비교하고, 각 제어 방법의 성능을 시제품의 효율 측정을 통해 검증한다.

2. 본론

2.1 LLC 공진형 컨버터의 한계

그림 1의 LLC 공진형 컨버터는 PFM(Pulse Frequency Modulation) 방법을 사용하여 공진 네트워크의 임피던스를 조절해 출력 전압을 제어한다. 스위칭 주파수가 증가하면 출력 전압이 감소하고 스위칭 주파수가 감소하면 출력 전압이 증가하는 스위칭 주파수와 전압 이득이 반비례하는 관계를 갖는다. 그림 2의 전압 이득 곡선을 보면, 주파수 및 부하에 따라 전압 이득 곡선이 변화한다. 중부하의 경우에는 스위칭 주파수를 조절해 원하는 출력 전압을 얻을 수 있다. 하지만 그림 2의 Q=0.24인 경부하 영역에서는 스위칭 주파수를 증가시켜도

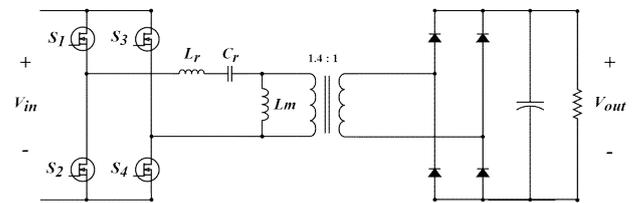


그림 1 LLC 공진형 컨버터 회로도
Fig. 1 Scheme of LLC resonant converter

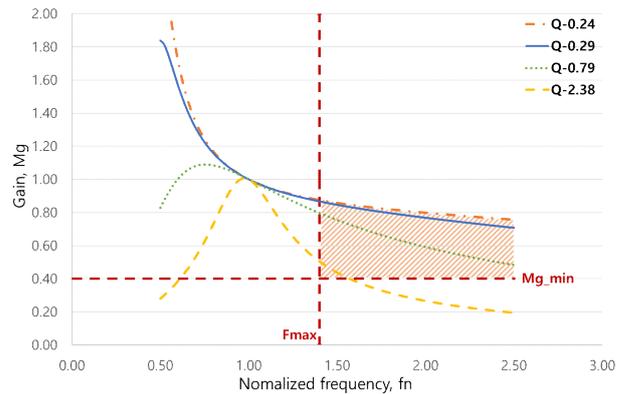


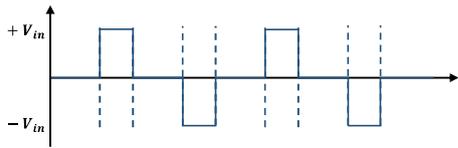
그림 2 퀄리티 팩터 Q 값에 따른 전압 이득 곡선
Fig. 2 Voltage gain curve according to quality factor Q

전압 이득 곡선의 변화량이 적어 최소 전압 이득을 달성하는데 어려움이 있다. 따라서 주파수를 제어해 낮은 출력 전압을 얻기에는 물리적인 한계가 있기 때문에 공진 네트워크의 입력 전압을 직접적으로 줄이는 방법으로 출력 전압 제어가 가능하다.

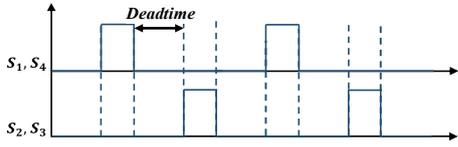
2.2 듀티 및 위상 제어

PFM 방법은 디지털 제어기 내부 PWM 출력 신호의 주파수와 반비례하는 값을 갖는 카운터 값(TBPRD)의 조절을 통해 수행된다. 최대 스위칭 주파수(F_{max})일 때 값을 TBPRD_{min}으로 설정하고, 스위칭 주파수 내에서 동작하면 양의 값을 가지는 PI 제어기의 출력값을 더해지면서 출력 전압을 제어한다.

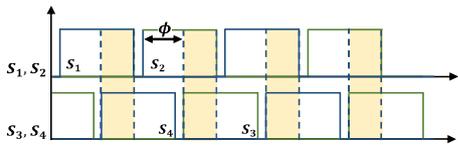
주파수 범위를 벗어나 저전압 경부하 영역에서 동작한다면 PI 제어기 출력값이 음수로 나타난다. 동작 가능한 최대 스위칭 주파수를 벗어나면 TBPRD 값을 TBPRD_{min}으로 고정하고 그림 3과 같이 음의 제어기 출력값을 데드 타임(t_{dt})이나 브리지 간 위상(∅)에 더해주어 입력 전압을 감소시킨다.



(a) 듀티 및 위상 제어 시 bridge 출력 전압 (V_{ab})

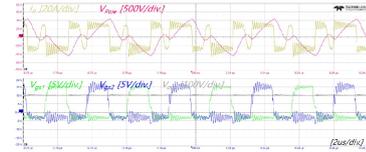


(b) 듀티 제어 방법의 게이트 구동 파형

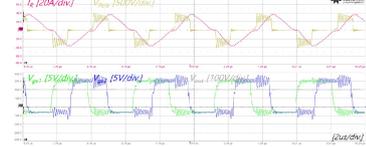


(c) 위상 제어 방법의 게이트 구동 파형

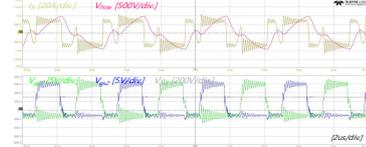
그림 3 제안한 제어 방법의 게이트 파형 및 Bridge 출력 전압
Fig. 3 Gate driving waveform of proposed duty and phase control method and Bridge output voltage



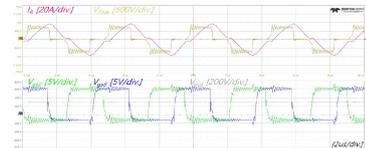
(a) 200V 출력 전압 듀티 제어



(b) 200V 출력 전압 위상 제어



(c) 300V 출력 전압 듀티 제어



(d) 300V 출력 전압 위상 제어

그림 6 출력 전압별 각 제어 방법의 주요 실험 파형
Fig. 6 Experiment waveform of each control method by output voltage

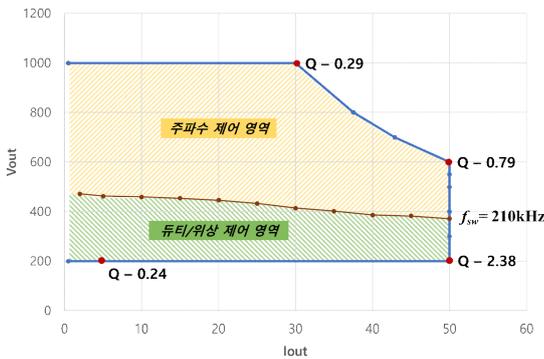


그림 4 LLC 공진형 컨버터 동작 영역
Fig. 4 Operating area of LLC resonant converter

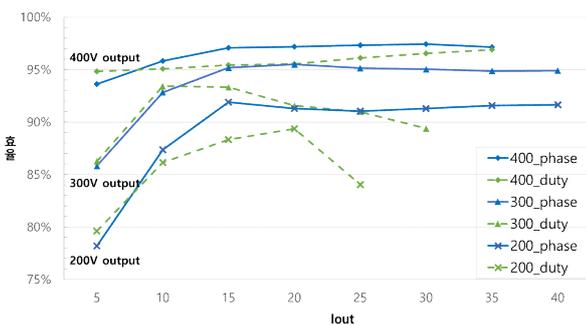


그림 5 출력 전압별 각 제어 방법의 효율 비교
Fig. 5 Efficiency comparison of each control method by output voltage

2.3 실험 결과

저전압 경부하 영역에서 제안한 듀티 및 위상 제어 방법을 검증하기 위해 LLC 컨버터 시제품 시험을 진행하였다. 설계한 컨버터의 동작 조건을 고려하여 최대 스위칭 주파수를 210kHz로 제한하였다. 그림 4는 설계한 컨버터의 동작 영역을 나타내며, 최대 스위칭 주파수를 기준으로 주파수 제어 영역과 듀티 및 위상 제어를 적용해야 하는 부분으로 나눌 수 있다. 해당 영역에서 각 제어 방법을 적용하여 결과를 비교하였다.

그림 5는 각 제어 방법에 따른 출력 전압별 효율 비교 그래프이다. 200V 출력 전압의 경우, 위상 제어 방법이 최대 7.02%의 효율 차이가 발생하고 300V 출력에서는 최대 5.64%의 효율 차이가 발생한다. 듀티 제어 방법은 데드 타임 구간에 전류 쪽으로 전류가 흐르는 반면, 위상 제어 방법은 bridge 내부에 환류 경로가 형성되어 그림 6에서 전체 전류의 크기가 더 작으므로 위상 제어 방법이 해당 영역에서 더 우수한 효율 특성을 나타낸다.

3. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 저전압 경부하 영역 제어를 위해 듀티 및 위상 제어 방법을 적용하였으며 실험을 통해 제어 성능을 비교하였다. 전반적으로 위상 제어 방법의 효율이 듀티 제어 방법보다 높은 것으로 나타나며 위상 제어 방법이 해당 영역 제어에 유리함을 확인하였다.

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

참고 문헌

[1] Bloomberg NEF, "Electric vehicle outlook 2023," April, 2023.
[2] 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.