

넓은 동작 영역을 가지는 전기자동차 충전기용 공진형 컨버터 제어 방법

박원우, 장푸름, 박상민, 주동명, 박준성
한국전자기술연구원 전력제어시스템 연구센터

A Control Method for Resonant Converter of Electric Vehicle Chargers with Wide Operation Range

WonWoo Park, Poo Reum Jang, Sang Min Park, Dongmyoung Joo, Joon sung Park
Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

최근의 800V 시스템을 포함한 모든 전기자동차를 충전하기 위해서는 할 수 있도록 200V에서 1,000V까지의 광범위한 출력 전압이 필요하다. 그러나 LLC 공진형 컨버터는 스위칭 주파수에 따른 임피던스 조절을 통해 출력 전압을 조절하므로 넓은 출력에는 불리하다. 따라서 본 논문에서는 하프브리지-풀브리지 모드 전환 방법 및 주파수-듀티 제어 방법을 제안하며, 30kW급 시차품 시험을 통해 제안한 제어 방법을 검증한다.

1. 서론

이전 세대의 전기자동차는 주로 400V 배터리 시스템을 사용했기 때문에 대부분의 급속 충전기는 100~500V 출력 전압 범위를 제공한다. 그러나 초급속 충전 및 주행 범위에 대한 사용자 수요가 증가함에 따라 고성능 전기자동차 위주로 800V 배터리 시스템이 적용되고 있다. 따라서 급속 충전 시스템 또한 400V 시스템뿐만 아니라 800V 시스템도 지원해야 한다^[1].

LLC 컨버터를 포함하여 전기차 충전 시스템에 널리 사용되고 있는 부하 공진형 컨버터는 PFM(Pulse Frequency Modulation)에 의해 공진 네트워크의 임피던스를 조절하여 출력 전압 및 전류를 제어한다. 하지만, PFM 제어 방법만 적용하는 것만으로는 경부하에서 넓은 전압과 출력 범위를 조절할 수 없다. 그러나 KC 61851-23 규격에 따르면 충전 시작 단계에서 1A내외의 충전 전류를 요청하는 구간이 존재하기 때문에 매우 낮은 경부하에서도 연속적인 전류 제어가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 LLC 컨버터의 경부하 동작을 위해 PFM 및 PWM(Pulse Width Modulation)방법을 결합한 제어 알고리즘을 제안한다. 또한 넓은 출력전압 범위를 위해 배터리 전압에 따라 하프 브리지/풀 브리지 동작 모드를 구분하고, 모드 전환 알고리즘을 적용한다^[2].

2. LLC Converter 제어 방법

2.1 주파수 제어 모드

주파수제어 모드에서는 PFM 방법을 사용하여 공진 네트워크의 임피던스 제어를 통해 출력 전력을 제어한다. DC-DC 컨버터의 스위칭 주파수가 증가함에 따라 공진 회로의 임피던스가 증가하고 출력 전압이 감소하며, 스위칭 주파수를 감소시키면 출력 전압이 증가한다.

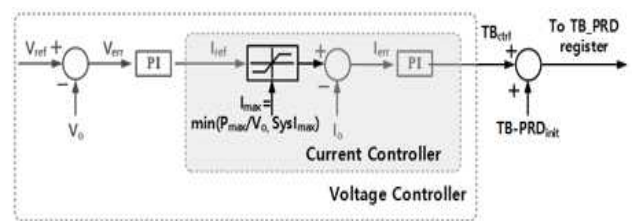


그림 1 LLC 컨버터 전압 및 전류 비례-적분 제어기

Fig. 1 PI controller of LLC converter to control voltage/current

일반적인 디지털 신호 프로세서(DSP)는 내부 클럭 주파수(f_{clk})와 PWM 신호 생성을 위한 타임 베이스 주기 카운터 값(TB_PRD)을 사용하여 출력 스위칭 주파수(f_{ref})를 제어한다. TB_PRD값은 식 1과 같이 유도된다.

$$TB_PRD = f_{clk} / f_{ref} \quad (1)$$

그림 1의 비례-적분(PI) 제어를 적용하여 LLC 컨버터의 출력 전압 및 전류를 제어한다. 제어기의 외부 루프는 배터리의 CV(Constant voltage) 충전 구간에서 전압 제어를 수행하며, 내부 루프는 CC(Constant current) 충전 영역에서 출력 전류를 제어한다. PI 컨트롤러의 출력값인 TBctrl은 초기 스위칭 주파수 값을 더해서 DSP의 TB_PRD 레지스터로 입력된다. 초기 스위칭 주파수 값을 의미하는 TB_PRDinit는 LLC 컨버터 설계 시 최대 스위칭 주파수를 나타낸다.

주파수 범위는 현재 PI 컨트롤러의 출력에 리미터를 적용하여 제한할 수 있다. LLC 컨버터의 PI 제어기가 낮은 출력 전압 및 경부하 동작 영역에서 출력전압을 제어할 수 없다면, TBctrl 값은 음수가 될 것이다. 그러나 음수인 TBctrl 값은 스위칭 주파수가 설계된 최대 주파수에 도달했음을 의미하기 때문에 스위칭 주파수를 설계값으로 제한하고 듀티 제어 모드를 적용한다.

2.2 듀티 제어 모드

TBctrl 값이 음수가 되면 컨트롤러는 더 이상 스위칭 주파수를 제어하지 않고, 듀티를 감소시켜서 변압기의 실제 입력 전압을 감소시킨다. 출력 듀티 비율은 TBctrl 값에 의해 결정된다.

$$Duty_{out} = 50\% + TB_{ctrl} \quad (2)$$

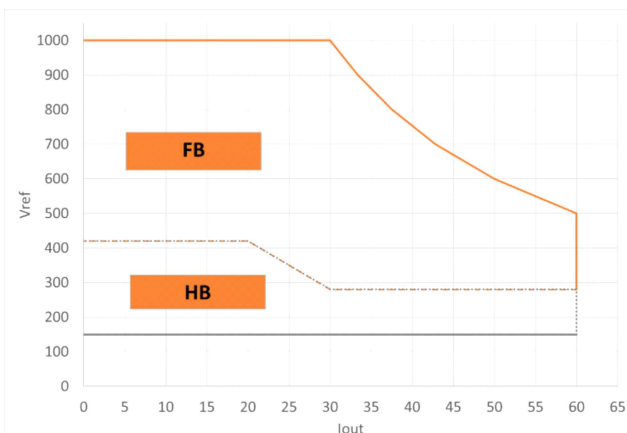


그림 2 하프브리지 및 풀브리지 동작 영역.

Fig. 2 The half-bridge and full-bridge operation map.

듀티 제어 모드에서 T_{Bctrl} 값은 항상 음의 값을 갖기 때문에 이 값을 초기 듀티 50%에 더하는 것은 출력 듀티의 감소를 의미한다. 듀티 제어 모드에서 그림 1의 동일한 PI 컨트롤러를 사용하기 때문에 매우 가벼운 부하 조건에서도 연속적인 출력 전압 및 전류 제어가 가능하다.

2.3 하프브리지-풀브리지 모드 전환 알고리즘

그림 2는 설계한 LLC 컨버터의 하프브리지 및 풀브리지 동작 영역을 나타낸다. 하프브리지 모드에서 풀브리지로의 동작 모드 전환은 다음과 같은 조건에서 발생한다.

- $V_{out} > V_{transition}$ (최소 전압 조건)
- $V_{out} * I_{out} > P_{transition}$ (전력 조건)
- Both $V_{out}, I_{out} > V_{min}, I_{max}$ (최대 전류 조건)

모드 전환 시퀀스는 다음과 같은 방법으로 수행한다.

- 1) DC-link 전압 지령 가변
- 2) DC-link 전압이 설정한 값에 도달할 때까지 대기
- 3) LLC 컨버터 PI제어기 변수 초기화
- 4) 풀브리지 모드로 LLC 컨버터 재기동

3. 실험 결과



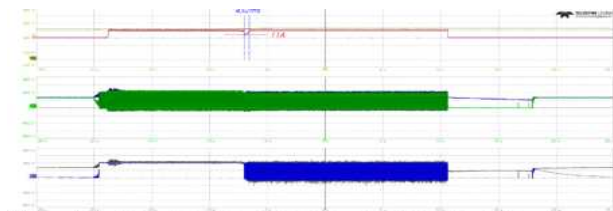
(a) 풀 브리지 최소 부하 동작 확인(500V/0.5A)



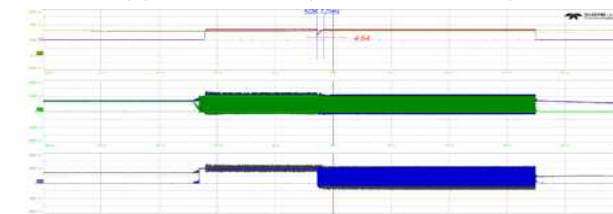
(b) 하프 브리지 최소 부하 동작 확인(150V/0.8A)

그림 3 각 동작 조건 별 최소 부하 동작 확인

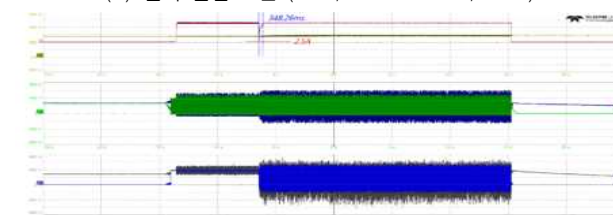
Fig. 3 Minimum load operation validation at each operating mode



(a) 전압 전환 조건 (415V/19A → 425V/19A)



(b) 전력 전환 조건 (315V/26.9A → 325V/26.9A)



(c) 최대 전류 전환 조건 (275V/50A → 285V/50A)

그림 4 각 조건 별 모드 전환 실험

Fig. 4 Experimental results of mode transition.

제안한 주파수-듀티 제어 방법 및 모드 전환 알고리즘을 검증하기 위해 제작한 시작품을 통해 실험을 수행하였다. 그림 3은 동작 조건 별 최소 부하 동작 확인 결과를 보여준다. 낮은 부하인 상태에서도 동작이 가능한 것을 확인하였다. 그림 4는 세 가지 조건에서의 모드 전환 결과를 보여주며, 제안된 모드 전환 알고리즘이 동작하는 것을 검증하였다.

4. 결론

이 논문에서는 LLC 공진 컨버터의 운전 조건을 다루기 위해 주파수, 듀티 제어 방법을 구현하였으며, 하프 브리지 및 풀브리지 작동 모드 변경 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 검증했다. 제안된 제어 방법은 1A의 낮은 부하 상태에서도 출력 전압을 조절할 수 있으며 전기차 충전 요구 사항을 충족하는 것을 확인하였다.

이 논문은 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가관리원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임(20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

참 고 문 헌

- [1] 김경만, 유종욱, 김태권, 강찬호, 전태원, “LLC 공진형 컨버터를 적용한 전기자동차 고압배터리 충전기 개발”. 전력전자학회 논문지, 제 18권 제 5호, pp. 443-447, 2013.
- [2] 이기영, 민성수, 박수성, 조영찬, 이상택, 김래영, “전기자동차 급속충전용 넓은 전압 범위를 갖는 30kW급 SiC MOSFET 기반 고속 스위칭 LLC 컨버터 설계 및 병렬 운전”, 전력전자학회 논문지, 제 27권 제 2호, pp. 165-173, 2022.