

전기자동차용 3.2kW급 DC-DC 컨버터를 위한 ISOP 능동클램프 포워드 컨버터 개발

김강산¹, 김병우¹, 조우식¹, 아디히스티라¹, 최세완¹, 허동영², 김수홍², 조경래²
 서울과학기술대학교¹, LG 이노텍²

Development of ISOP active-clamp forward converter for 3.2kW DC-DC Converter of EV application

Kangsan Kim¹, Byeongwoo Kim¹, Woosik Cho¹, Adhistira Naradhipa¹, Sewan Choi¹
 Dongyoung Huh², Soohong Kim², Kyungrae Cho²
 Seoul National University of Science and Technology¹, LG InnoTek²

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차용 저전압 배터리 충전기(Low-voltage DC-DC Converter, LDC)에 적합한 입력 직렬-출력 병렬 구조의 능동 클램프 포워드 컨버터의 모델링 및 제어기 설계를 제안한다. 제안하는 컨버터는 모든 스위치에서 소프트 스위칭을 성취하기 때문에 높은 효율을 달성할 수 있다. 또한 누설 인덕턴스의 영향을 포함한 컨버터의 정확한 소신호 모델을 통하여 모델링 기반의 제어기 설계를 제시한다. 제어기의 시뮬레이션 및 3.2kW급 시작품의 실험을 통하여 제안하는 컨버터의 성능을 검증하였다.

1. 서론

전기자동차에서는 14V 보조 부하에 전원을 공급하고 저전압 배터리를 충전하기 위한 저전압 직류변환장치(LDC)가 필요하다. 일반적으로 LDC는 수 킬로와트(1kW - 5kW)의 전력범위를 갖고 고전압배터리(260V - 440V)에서 저전압 배터리(14V)로 전력을 변환하는 역할을 한다. LDC에 가장 많이 사용되는 토폴로지는 추가 회로 없이 소프트 스위칭을 성취할 수 있는 위상천이 풀브리지 컨버터(Phase Shift Full Bridge converter, PSFB)이다 [1]. 그러나 LDC 응용에서 높은 강압비를 만족하기 위해서는 높은 권선비가 요구되기 때문에 순환 전류 및 듀티 손실이 증가한다는 단점이 있다. 또한 변압기의 권선비를 줄이기 위해 입력직렬 - 출력병렬(Input Series - Output Parallel, ISOP) 구조를 적용할 수 있지만 PSFB에 ISOP 구조를 적용하면 많은 스위치가 요구되므로 적절하지 않다.

본 논문에서는 PSFB와 비슷한 성능을 달성할 수 있는 ISOP 구조의 능동 클램프 포워드 컨버터(Active Clamp Forward Converter, ACFC)를 3.2kW급 LDC에 적용 하였다. 일반적으로 전기자동차 응용의 요구사항인 높은 신뢰성 및 동특성을 만족하기 위해서는 높은 제어성능이 필요하기 때문에 소신호 모델에 기초하여 제어기를 설계하였다.

2. ISOP ACFC의 모델링 및 제어기 설계

2.1 ISOP ACFC의 모델링

그림 2는 ISOP ACFC의 회로도를 나타내며 컨버터는 ISOP 구조로 연결된 두 개의 ACFC로 구성되어 있다.

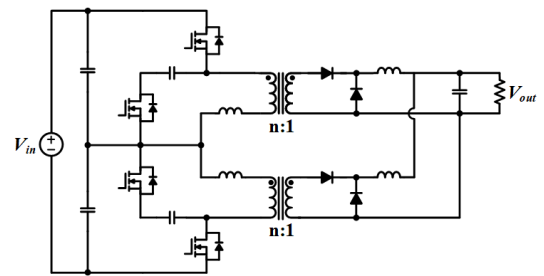


그림 2. ISOP ACFC 회로도

일반적으로 ACFC 모델링에 대해 다른 논문들에서는 누설 인덕턴스의 영향이 없다고 가정하여 소신호 모델링을 하며, 그에 따라 기존의 백 컨버터의 모델링과 같다[2]. 하지만 누설 인덕턴스의 영향을 무시한 모델링은 동특성 및 제어기의 정확도를 떨어뜨리게 된다. 본 논문에서는 [3]를 통하여 누설 인덕턴스를 포함한 모델링 기법을 사용하였다. ACFC 동작에서 누설 인덕턴스의 영향을 고려하여 출력 인덕터 전류, 출력 전압, 자화 전류 및 클램프 커패시터 전압의 변수가 포함된 평균 낮은 변수 상태방정식을 구성하였다. 다음으로 소신호 해석을 통해 낮은 변수 상태방정식을 선형화 하여 듀티에 따른 인덕터 전류, 출력 전압에 따른 인덕터 전류의 식을 구하면 각각 식(1), (2)와 같고 누설 인덕턴스의 영향을 포함한 ACFC 모델을 나타낸다.

$$G_{id}(s) = \frac{n V_{in} L_m (1 + sRC)}{as^2 + bs + c} \tag{1}$$

여기서 a, b, c는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bullet a &= n^2 LCR(L_m + L_k) \quad \bullet b = RCL_m L_k f_s + n^2 L(L_m + L_k) \\ \bullet c &= L_m L_k f_s + n^2 R(L_m + L_k) \end{aligned}$$

$$G_{vi}(s) = \frac{R}{1 + sRC} \tag{2}$$

2.2 제어기 설계

ISOP ACFC의 제어기는 내부 전류 루프, 외부 전압 루프로 구성되고 그림 4는 컨버터의 이중 루프 제어 시스템을 나타냈으며, 표 1은 동적 사양을 나타낸다.

표 1. 동적 사양

Item	Specification	Remarks
Gain margin	>6dB	-
Phase margin	>50°	-
Load regulation	±10% overshoot and undershoot	With 2ms 10% to 90% load ramp change
Line regulation	±10% overshoot and undershoot	With 5ms 260V to 440V ramp change

외부 루프 제어와 내부 루프 제어 모두 PI 제어기를 사용하여 설계하였고 사용된 수동 소자의 값은 $L=10\mu\text{H}$, $C=47\mu\text{F}$, $L_m=100\mu\text{H}$, $C_c=1\mu\text{F}$, $L_k=7\mu\text{H}$, $n=4$ 이다. MCU의 최대 허용 대역폭은 8kHz이며 내부 루프 제어기의 경우 $K_p = 0.0068$, $K_i = 549$ 의 값으로 7.1kHz의 대역폭을 갖고, 외부 루프 제어기의 경우 $K_p = 0.58$ 및 $K_i = 83694$ 의 값으로 1.7kHz의 대역폭을 갖는다. 그림 5와 그림 6은 MATLAB을 이용한 내부 루프와 외부 루프의 주파수 응답을 나타내며, PI 제어기의 설계 값을 사용하여 요구되는 위상 및 Gain Margin이 충족되었음을 확인할 수 있다.

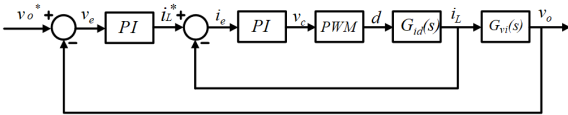


그림 4. 이중 루프 제어 시스템

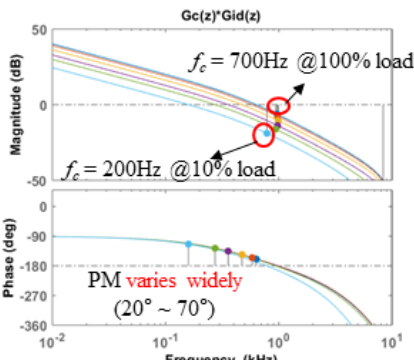


그림 5. 내부 루프의 주파수 응답 특성

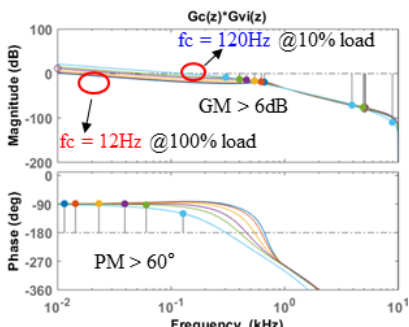
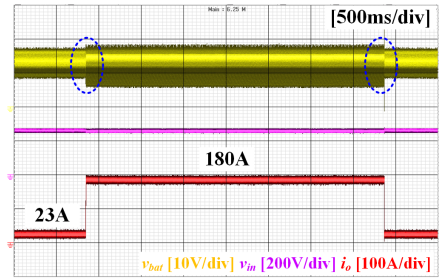


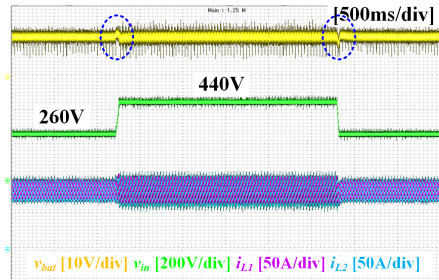
그림 6. 외부 루프의 주파수 응답 특성

3. 실험 결과

ISOP ACFC의 동작 및 동특성을 검증하기 위해 3.2kW, 100kHz의 시작품을 제작하여 실험하였다. 그림 7은 제어기 설계 값을 통해 실험한 동적응답 파형을 나타낸다. 실험 결과를 통해 부하 변동시의 오버슈트/언더슈트와 입력전압 변동시의 오버슈트/언더슈트가 주어진 사양에 만족하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 부하 변동



(b) 입력전압 변동

그림 7. 동적응답 실험 파형

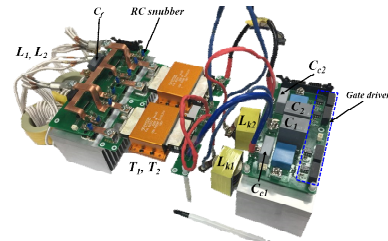


그림 8. 3.2kW급 시작품

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차용 3.2kW급 DC-DC 컨버터를 위한 ISOP ACFC를 제안하였다. 제안하는 컨버터는 모든 스위치에서 ZVS 턴 온 및 모든 다이오드에서 ZCS 턴 오프를 성취할 수 있다. 누설 인덕턴스의 영향을 포함하여 보다 정확한 모델링을 통해 제어기 설계를 하였다. 제어기의 시뮬레이션 및 3.2kW급 시작품의 실험을 통하여 ISOP ACFC의 타당성 및 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] M. Pahlevaninezhad, J. Drobnik, P. K. Jain, and A. Bakhshai, "A load adaptive control approach for a zero-voltage-switching dc/dc converter for electric vehicles," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 920-933, Feb. 2012.
- [2] Q. M. Li, F. C. Lee and M. M. Jovanovic, "Large-signal transient analysis of forward converter with active-clamp reset," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 15-24, Jan 2002.
- [3] Min Chen and Jian Sun, "Reduced-order averaged modeling of active-clamp converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 487-494, March 2006.