

전기자동차 급속충전기를 위한 HMF기법 절연형 PFC

이병권*, 김기웅*, 김영세*, 최경민*, 이준영**

(주)에스케이 텔레시스*, 명지대학교 전기공학과**

Isolated PFC using HMF for EV Fast Charger

Byung Kwon Lee*, Gi Woong Kim*, Young Se Kim*, Kyeong Min Choi*, Jun Young Lee**

SK Telesys*, Department of Electrical Engineering, Myongji University**

ABSTRACT

본 논문은 넓은 출력전압 범위와 High Power Density를 위한 절연형 HMF PFC(Isolated Harmonic Modulation PFC)를 제안한다. 제안된 PFC는 변압기 leakage inductance를 회로에 적용시켜 switching device의 voltage stress를 효과적으로 줄일 수 있는 voltage-fed 형태의 full-bridge 구조를 기반으로 한다. 출력 측 CV(Constant Voltage) control을 통하여 출력 혹은 link 전압을 load 변동에 상관없이 일정 유지시켜준다. 또한 CC(Constant Current) control 방식을 사용하여 출력 측 battery 특성 조건이 변동되어도 일정하게 충전시켜 줄 수 있도록 한다. HMF 제어방식을 적용한 3.3kW Prototype을 통해 이를 입증한다.

1. 서론

절연형 DC/DC의 경우 가장 보편적인 buck형 동작을 하는 PSFB(Phase-Shift Full-Bridge) 컨버터가 있다. PSFB의 경우 출력전압 범위가 넓기 때문에 범용충전기에 가장 쉽게 적용이 된다. 하지만 2차 측 voltage stress 및 high circulating current와 한정된 범위의 ZVS 영역 및 snubber 회로에 의한 loss 등으로 높은 효율을 달성하기 어렵다. 이 외에도 많은 특징 컨버터들이 도입이 되었지만 출력전압 범위가 넓지 않은 특정 전압의 용도로만 도입이 되고 있다. 일반적인 범용충전기에 넓은 출력전압 범위를 얻기 위해서는 isolated PFC 회로와 non-isolated DC/DC 형태의 2단 구조가 고려될 수 있다. 이는 non-isolated 컨버터가 고효율을 달성할 수 있도록 설계가 된다면 충전기의 전체 효율은 isolated PFC에 의해 결정이 될 수 있다. 현재 대부분의 isolated PFC의 경우 대다수가 current-fed 형태의 구조를 사용하고 있다. 하지만 이 구조는 변압기 leakage inductance로 인한 1차 측 스위치의 심각한 spike-voltage 문제를 갖게 되며 보조 snubber 회로를 요구한다. isolated PFC의 또 다른 형태는 SRC(Series Resonant Converter) 형태를 기반으로 하는 valley-fill 구조의 회로이다. 이 구조는 passive element의 구성만으로 역률 규제(NIEEE1000-3-2)를 만족시킬 수 있으며, DC link 전해 capacitor의 voltage stress가 AC line 평할 전압 최대치의 절반이므로, 작은 내압의 전해 capacitor 사용이 가능하며, 가격 및 부피 축소도 가능하다. 하지만 양산을 고려할 경우 1개의 capacitor라도 단락이 되면 다른 한쪽이 과전압에 의한 방폭이 될 수도 있다. 또한 voltage-fed 방식의 우수함을 갖게 되지만

공진동작으로 인한 높은 전류스트레스를 갖게 되며, 경부하에서 낮은 switching 주파수로 인한 문제점도 야기된다.

따라서 본 논문에서는 넓은 출력전압 범위를 갖는 isolated PFC 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 변압기 leakage inductance를 회로에 적용시키므로 switching 소자의 voltage stress를 제거할 수 있도록 voltage-fed 형태의 full-bridge 구조를 기반으로 한다. 또한 ADAB 구조를 사용하는 몇 가지 절연형 PFC의 타입의 구조와 유사한 시점에서 접근한다. 제안된 회로는 3.3kW 용량의 prototype을 통하여 검증 하였다.

2. Topology 제안 및 분석

DCM 동작은 ZV-ZCS switching 특성으로 인한 주스위치의 switching loss를 줄이기에 적합하며, IGBT 및 MOSFET을 switching 소자로 사용할 수 있다. 그러나 PF가 낮고 2차 switching loss가 높다는 단점을 가지고 있어 고 전력 설계에 어려움을 주게 된다. 그림 1은 제안된 isolated PFC 컨버터이다. PFC 컨버터를 통해 AC 전원을 DC 전압으로 변환 시 역률 제어와 하모닉 제어가 포함된 알고리즘으로 전압을 승압 후 DC-DC 컨버터를 통해 battery 전압을 대응하게 된다. PFC는 출력 측의 CV control을 통하여 PFC의 출력 혹은 link 전압을 load 변동에 상관없이 일정 유지 시킨다. 부가적으로 Buck converter를 통해 CV control을 통하여 load 변화에 상관없이 항상 일정한 전압을 유지하도록 한다. 이 제어 방식은 일반적으로 실제 CV 충전 등 battery 충전 시 공급 전원, 전압을 일정하게 유지하면서 충전할 수 있도록 도와주는 방식으로 사용되고 있다. 또한 CC control을 사용하여 출력단의 battery의 특성 조건이 변동되어도 일정하게 충전시켜 줄 수 있도록 한다. 모든 고조파 컨트롤 및 출력 제어는 2차 측 스위치에 의해 수행되며, 고조파 변조 기술은 입력전류 모니터링 없이 거의 단일 역률을 얻기 위해 채택된다. 전기적 절연과 고조파 컨트롤은 PFC stage에서 수행되어지며 충전 제어는 buck 컨버터에서 이루어진다. 1차 측 스위치 $M_1 \sim M_4$ 는 고정 주파수와 50%의 duty-ratio로 동작하며, PFC 측의 출력전압 및 전류 제어는 2차 측의 M_5, M_6 에서 이뤄진다.

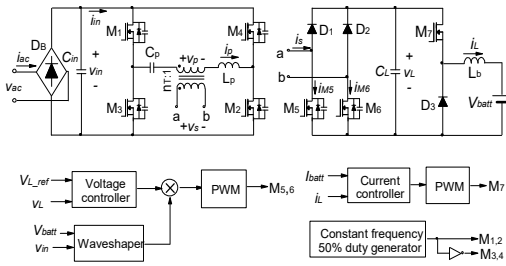


그림 1 제안된 절연형 PFC 회로도
Fig. 1 Isolated HMF PFC

2.1 제안된 회로의 고조파 컨트롤퍼

M_1 과 M_2 의 1차 스위치가 off 되면 1차 측 스위치에서 모든 drain-source 전압은 자화 전류를 이용하여 교번이 되며 교번 동작 후 M_3 및 M_4 의 body diode를 통해 흐르며, 이때 ZVS 조건을 달성할 수 있다. 그림 2 (a)는 d_a 가 일정한 기존의 DCM 동작의 인덕터 전류 첨두치와 라인 전류 파형을 나타낸다. 입력전류는 입력전압 파형을 따르지만, 정류된 라인 전류와 동일한 입력전류의 switching 평균값은 왜곡되며, 이 특성은 기존 DCM PFC 컨버터의 특성과 유사하다. 순수한 정현파 전류 파형을 얻으려면 역률이 1이 되도록 제어가 필요하다. 변조된 duty비는 전압 제어기에 의해 생성된 d_a 의 일정한 값과 역률 개선을 위한 변조 값 M_2 로 구성된다.

그림 2 (b)는 고조파 변조 기법을 채용한 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 d_a 를 변조하면 사인파 전류를 얻을 수 있다.

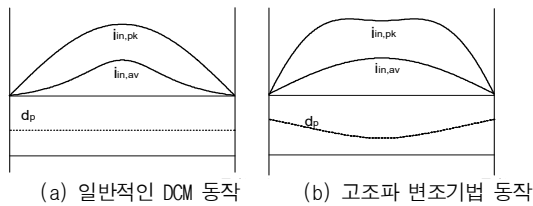


그림 2 일반적인 DCM 동작과 HMF 동작 전류 파형
Fig. 2 Inductor current envelope and line current waveform

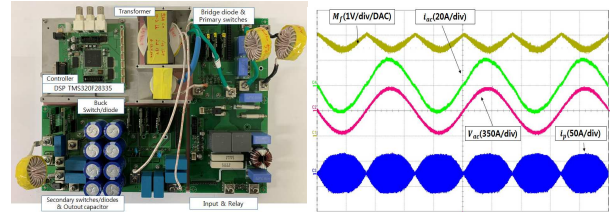
고조파 변조 기법이 존재하지 않을 경우 입력전류의 첨두치는 입력전압 모양을 추종하지만 AC 전류는 왜곡을 보인다. 하지만 변조 기법이 추가될 시 입력전류의 첨두치를 왜곡시켜 최종적인 AC 전류가 왜곡이 없는 정현파를 만들 수 있다. 위의 기법이 없어도 컨버터는 동작을 하게 되지만 추가적인 역률개선이 필요할 시 위의 기법을 사용하는 것이 효과적이다.

3. 실험 및 결과 검토

그림 3은 본 논문에서 제시한 회로의 검증을 위해 설계된 prototype과 HMF 기법을 적용한 실험파형이다. Harmonic duty M_2 는 DSP 컨트롤러의 DAC 변환기를 사용하여 측정하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 M_2 에 따라 연속적으로 작동 duty비를 변경함으로써 넓은 부하 범위에서 깨끗한 정현파 전류 파형을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

표 1 Prototype 실험 조건
Table 1 The experimental conditions

Items	Specification
Maximum power $P_{o,max}$	3.3kW
Input voltage V_{in}	220 ~ 253V _{AC}
Battery voltage V_{batt}	500V _{DC}
Switching f_s	50, 100



(a) Prototype Isolated HMF PFC (b) HMF 적용 실험 파형

그림 3 제작된 절연형 HMF PFC Prototype과 실험 파형
Fig. 3 Prototype HMF PFC and waveform in accordance with the HMF conditions

4. 결론

본 논문에서는 넓은 출력범위와 구조 간소화를 위한 HMF 기법을 사용한 절연형 PFC 컨버터를 제안하였다. Prototype의 컨버터는 1kW 이상의 출력에서 역률은 0.983 항상 이상으로 기록이 된다. 또한 효율은 $V_{ac} = 220 V_{rms}$, $P_o = 3.3kW$ 에서 95.6%로 측정되며 $V_{ac} = 253 V_{rms}$, $P_o = 3kW$ 에서 최대 효율 96.2%가 측정되었다. 입증된 컨버터는 급속 충전을 위해 입력전압 조건 380V_{ac}, 출력전압 조건 800V_{ac}, 부하조건(단상 모듈) 5kW급 Interleaved 방식의 구조로 모듈화를 통하여 최근 대두되고 있는 충전시간 단축의 요구 등에 대응할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Byung-Kwon LEE, J. Y. LEE "An Isolated PFC Converter with Harmonic Modulation Technique for EV Chargers", 2018 International Power Electronics Conference, pp. 3030-3033, 2018.
- [2] S. N. Vaishnav and H. Krishnaswami, "Single-stage isolated bi-directional converter topology using high frequency AC link for charging and V2G applications of PHEV," VPPC'11, pp. 1-4, 2011.
- [3] J. Y. Lee and H. J. Chae, "6.6-kW Onboard Charger Design Using DCM PFC Converter With Harmonic Modulation Technique and Two-Stage DC/DC Converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 3, pp. 1243-1251, Mar. 2014.