

Semi-Active Rectifier를 적용한 센서리스 단일단 브리지리스 PFC 컨버터

아드히스티라 나라드히파, 강수한, 하이 트란, 사흐파자르 놀 바누, 최세완[†]
서울과학기술대학교

A Current Sensor-less Bridgeless CCM Single-Stage PFC Converter with Semi-Active Rectifier

Adhistira M. Naradhipa, Suhan Kang, Tran Hai, Nur Banu Sagpazar, Sewan Choi[†]
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 입력전류를 센싱 받지 않아도 역률 보상을 하는 새로운 단일단 브리지리스 AC-DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터의 스위치는 전구간에서 ZVS(Zero Voltage Switching) 턴 온을 성취하며, 다이오드는 전구간에서 ZCS(Zero Current Switching) 턴 오프를 성취한다. 제안하는 컨버터의 넓은 범위의 출력전압 제어와 간단한 전력 제어를 위해 SDAB(Semi-Dual Active Bridge)기반의 모듈레이션 기법을 적용하였다. 1kW급 50kHz의 스위칭 주파수를 갖는 시제품을 통해 본 논문의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

전기자동차(Electrical Vehicle : EV) 배터리 충전기, Front-End SMPS(Swith Mode Power Supply) 및 통신 전원 공급 장치 등의 여러 분야에서 안전 규정을 만족하기 위해 고주파 절연 AC-DC 컨버터가 요구된다. 고주파 절연 AC-DC 컨버터는 일반적으로 단일단 구성 방식과 2단 구성 방식으로 나누어진다^{[1]-[2]}.

단일단 AC-DC 컨버터는 AC단에서 DC단으로의 단일 전력 변환을 하기 때문에, 그러므로 2단 구성 방식과 비교하여 고효율과 고전력밀도를 기대할 수 있다^{[3]-[4]}.

DCM(Discontinuous Current Mode) 동작을 하는 단일단 AC-DC 컨버터는 높은 역률과 소프트 스위칭을 성취할 수 있는 장점이 있다^[5]. 하지만 불연속전류모드 동작은 입력 필터 인덕터의 손실이 커진다. CCM(Continuous current mode) 동작을 하는 단일단 인터리브드 AC-DC 컨버터는 전 스위치가 전 구간에서 ZVS 턴 온을 성취할 수 있지만^[6], 자화 인덕턴스를 작게 구현하거나 병렬로 인덕터를 추가해야 하기 때문에 컨버터의 크기가 커질 수 있다. 연속전류모드에서 동작하고 적은 소자수로 제안된 단일단 AC-DC 컨버터는^[7], 스위치의 전 구간에서 ZVS 턴 온을 위해서는 작은 자화인덕턴스가 요구되고, 변압기의 저주파 성분이 나타나기 때문에 변압기의 코어부피가 커지게 된다. 앞에서 언급한 기준에 제안된 AC-DC 컨버터는 연속전류모드에서 동작하기 위해서 모두 입력전류센서가 필요하다. 본 논문에서는 입력 전류를 센싱받지 않고 연속전류모드 동작에서 역률보상을 성취할 수 있는 새로운 단일단 절연형 AC-DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 브리지리스 구조이지만, 메인 스위치가 ZVS 턴 온을 달성하기 때문에 다이

오드의 큰 역회복 손실없이 CCM 동작이 가능하다. 또한 2차측 스위치는 2차측 스위치 또한 전구간에서 ZVS 턴 온과 다이오드는 전구간 ZCS 턴 오프를 성취한다. 제안하는 컨버터는 전력 제어가 간단하고 넓은 출력 전압 범위를 갖으며, 모든 동작 조건에서 소프트 스위칭 동작을 달성할 수 있는 SDAB를 기반으로 한 변조 기법을 적용한다^[8].

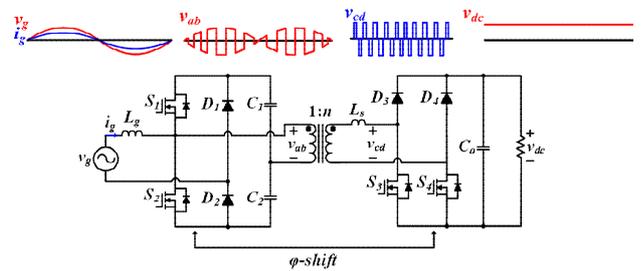


그림 1. 제안하는 AC-DC 컨버터의 회로도

2. 제안하는 컨버터

그림 1은 제안하는 단일단 AC-DC 컨버터의 회로도이다. 제안하는 컨버터는 DC측에는 Semi-Active Rectifier와 AC측에는 하프 브리지 컨버터, 그리고 부스트 토탈폴 PFC 컨버터로 구성되어 있다. 제안하는 컨버터는 AC측에서 DC측으로 전력을 공급하기 위해 추가 누설인덕턴스 L_s 를 사용하였다.

스위치 S1과 S2는 고정 듀티 0.5로 상보적으로 동작하고 1차측과 2차측 사이의 위상차를 통해 전력 전달이 이루어짐으로써 다음과 같은 특징을 갖는다. : 1) 클램프 커패시터 전압 v_{c1} 과 v_{c2} 이 동일하기 때문에 변압기에 저주파 성분이 나타나지 않는다. 2) 전 구간에서 모든 스위치가 ZVS 턴 온을 성취하고 모든 다이오드가 ZCS 턴 오프를 성취한다. 3) 전력 제어가 간단하다. 4) CCM PFC 동작을 위해 입력전류를 간접적으로 형성할 수 있다.

그림 2는 계통주기에 따른 동작 파형이다. 변압기의 1차측 전압 v_{ab} 는 S1이 켜지면 v_{c1} 이 인가되고, S2가 켜지면 v_{c2} 가 인가된다. 변압기 전압에 저주파 성분이 포함되어 보이지만, v_{ab} 전압은 고주파 성분으로만 구성되어 있다. 따라서 변압기 부피를 작게 사용할 수 있다.

2차측 스위치 S3와 S4는 180도 위상차를 갖고 식(1)에서 정의된 듀티를 적용하여 스위칭 주파수로 동작한다. 2차 측 스위치

레그의 전압은 2차측 L_s 에 인가되는 3레벨 v_{cd} 전압이다. $v_{tri,S1S2}$ 와 $v_{tri,S4}$ 사이의 위상차 ϕ 는 DC 파워 전달을 결정하는 제어 변수이다. 1차측과 2차측 전압의 위상차 α 는 식 (2)에 의해 정해지고, β 는 전력 전달이 이루어지지 않는 구간으로 식 (3)에 의해 결정된다. m 는 계통 전압 v_g 와 출력 전압 v_{dc} 의 전압 전달비이다.

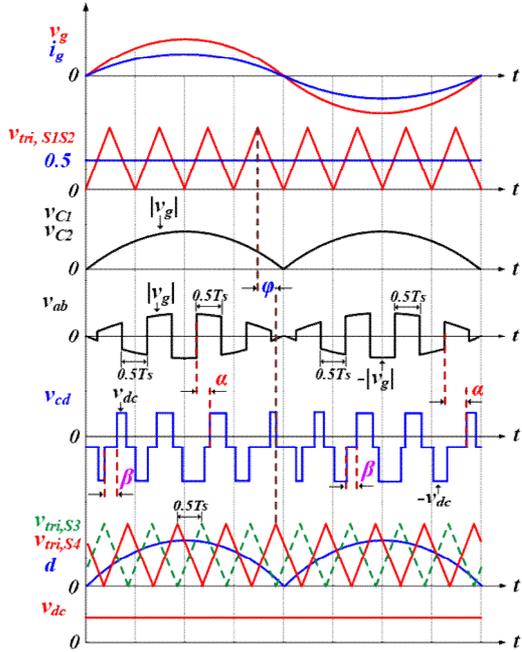


그림 2. 계통 주기에서의 동작 파형

순시 평균 전력 $p(t)_{ave}$ 에 대한 식은 (4)에 의해 주어진다. 이는 입력 전압에 따라 달라지고 DC 전력 오프셋을 갖고 계통 주파수 2배로 나타난다.

$$d = m_f |\sin(2\pi f_g t)| \quad (1)$$

$$\alpha = (1.5 - d)\pi - \Phi \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\alpha - (1 - m)\pi}{m + 2} \quad (3)$$

전압 v_{ab} 및 v_{cd} 는 정류 된 계통 주파수의 파형과 같도록 i_{Ls} 를 형성하지만 i_g 에는 스위칭 주파수만 존재한다. 입력전류 i_g 는 정류 된 평균 i_{Ls} 의 파형을 따르며 계통 주파수의 성분으로만 구성된다. 계통의 양주기 및 음주기 모두에서 CCM PFC 동작이 자동으로 이루어지기 때문에 입력 전류 i_g 를 만들기 위한 입력 전류 센싱이 필요하지 않다.

그림3은 스위칭 주기에서 제안 된 AC-DC 컨버터의 주요 파형을 나타내며, 모든 스위치가 ZVS 턴 온 및 모든 다이오드가 ZCS 턴 오프를 성취하는 것을 확인할 수 있다. 기존의 토탈 풀브스트 PFC의 다이오드 역회복 문제는 1차측 스위치의 ZVS 턴 온으로 인해 해결될 수 있으므로 브리지리스 구조가 포함 된 컨

버터의 CCM 동작에서도 큰 효율 감소 없이 사용 가능하다.

그림 4는 제안 된 AC-DC 컨버터의 제어 블록도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안 된 컨버터는 SDAB 기반 변조 기법으로 입력 전류를 자동으로 만들기 때문에 제어 구조에 입력 전류의 센싱이 필요 없다.

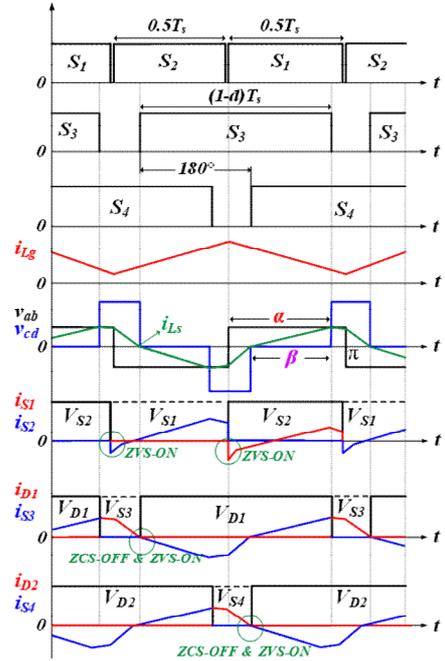


그림 3. 스위칭 주기에서의 동작 파형

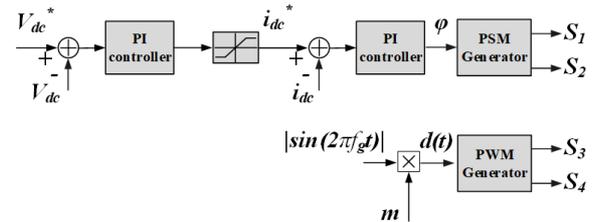
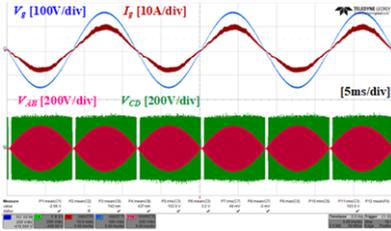


그림 4. 제안하는 AC-DC 컨버터의 제어 블록도

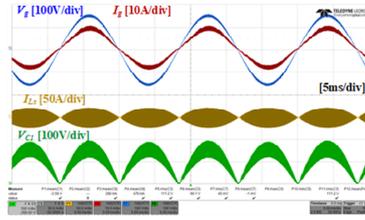
3. 실험 결과

1kW, 50kHz, 110Vac/250Vdc 시작품의 실험을 통하여 제안하는 AC-DC 컨버터의 타당성 및 성능을 검증하였다. 그림 5 (a)-(c)는 컨버터의 동작원리를 나타내는 실험파형이며, 그림 5 (c)에서 SDAB동작을 확인할 수 있다. 그림6 (a)-(c)은 소프트 스위칭을 나타낸다.

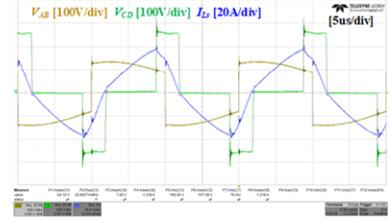
$$p(t)_{ave} = \frac{n|v_g|v_{dc}}{4\pi^2 f_s L_s} \{ [m^2(\alpha - \pi)(\pi - \beta)] + [m(\alpha\pi - \beta\pi + 2\alpha\beta)] + [\beta\pi - 2\alpha\beta + \pi^2] \} \quad (4)$$



(a) V_g, I_g, V_{ab} , and V_{cd}

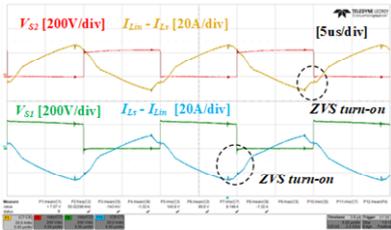


(b) V_g, I_g, i_{Ls} , and V_c

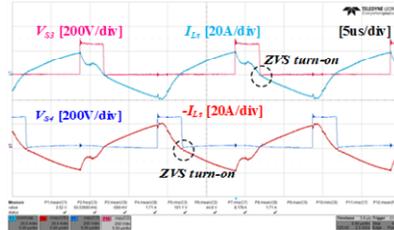


(c) V_{ab}, V_{cd} , and i_{Ls}

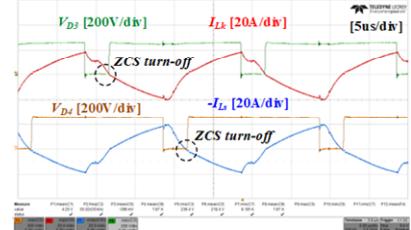
그림 5. Experimental waveform of operation principle



(a) Primary switches



(b) Secondary switches



(c) Secondary diodes

그림 6. Experimental waveform of soft-switching performance

4. 결론

본 논문에서는 새로운 단일단 절연형 AC-DC 컨버터가 제안되었다. 제안된 컨버터는 SDAB 기반의 변조 기법으로 입력 전류를 감지할 필요 없이 CCM PFC 동작을 달성할 수 있으며, 주 스위치가 ZVS 턴 온을 할 때 기존의 토탑풀 부스트 PFC 컨버터에서와 같은 다이오드 역회복 문제로 인한 효율 감소가 없어 브리지리스 구조의 CCM 동작이 가능하다. 변압기에 저주파 성분이 없기 때문에 소형 변압기를 사용할 수 있고, 모든 반도체 소자는 입력력 전압 및 부하 변동에 대해 소프트 스위칭을 성취할 수 있다. 110kV/250Vdc에서 1kW, 50kHz 시작품의 실험 결과를 통해 제안된 컨버터의 타당성 및 성능을 검증하였다.

참고 문헌

[1] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169, May 2013.

[2] M. Kasper, D. Bortis, G. Deboy and J. W. Kolar, "Design of a Highly Efficient (97.7%) and Very Compact (2.2 kW/dm³) Isolated AC-DC Telecom Power Supply Module Based on the Multicell ISOP Converter Approach," in ,vol.32,no.10,pp.7750-7769,Oct.2017.

[3] B. Singh, S. Singh, A. Chandra and K. Al-Haddad, "Comprehensive Study of Single-Phase AC-DC Power Factor Corrected Converters With High-Frequency Isolation," in ,vol.7,no.4,pp.540-556,Nov.2011.

[4] G. Moschopoulos and P. Jain, "Single-phase single-stage power-factor-corrected converter topologies," in ,vol.52,no.1,pp.23-35,Feb.2005.

[5] Y. Du and A. K. S. Bhat, "Analysis and Design of a High-Frequency Isolated Dual-Tank $\$LCL\$$ Resonant AC-DC Converter," in ,vol.52,no.2,pp.1566-1576,March-April2016.

[6] B. Kim, M. Kim and S. Choi, "A reduced component count single-stage electrolytic capacitor-less battery charger with sinusoidal charging," *Kaohsiung*,2017,pp.242-246.

[7] S. G. Jeong, W. J. Cha, S. H. Lee, J. M. Kwon and B. H. Kwon, "Electrolytic Capacitor-Less Single-Power-Conversion On-Board Charger With High Efficiency," in ,vol.63,no.12,pp.7488-7497,Dec.2016.

[8] S. Kulasekaran and R. Ayyanar, "Analysis, Design, and Experimental Results of the Semidual-Active-Bridge Converter," in ,vol.29,no.10,pp.5136-5147,Oct.2014.