

넓은 출력전압제어범위를 갖는 단일전력단 교류-직류 컨버터

이강우, 김민지, 유경중, 이준환, 김은수[†], 황인갑
전주대학교

A Single Stage AC-DC Converter Operating with A Wide Output Voltage Range

G.W Lee, M.J Kim, K.J Yoo, J.H Lee, E.S Kim[†], I.G Hwang[†]
JeonJu University

1. 서론

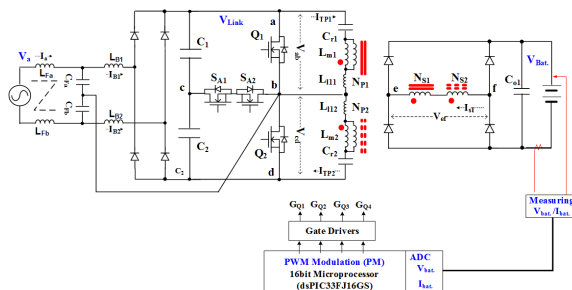
최근 개발 및 출시되고 있는 전기자동차(EV) 충전시스템은 단상 AC전원을 입력받아 입력역률개선과 고효율 AC/DC 변환을 위한 Interleaved PFC컨버터, Bridgeless PFC컨버터 등의 Topology가 사용되고 있으며, 변환된 DC전압을 입력받아 배터리를 충전하기 위한 절연된 고주파 DC/DC컨버터로 LLC 공진 컨버터, 3레벨 컨버터 등이 사용되어 사이즈저감 및 경량화를 꾀하고 있다^[1,2].

본 논문에서는 넓은 출력전압제어에 대응할 수 있고, 모든 부하에서 고효율을 달성할 수 있도록 두 개의 공진탱크회로를 갖는 보조스위치적용 단일전력단 AC/DC 컨버터를 제안하였다.^[3]

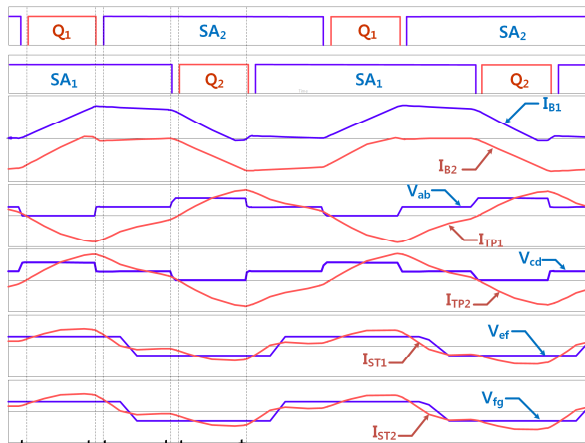
2. 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터

단상 AC전원(V_a : 220V_{rms})을 입력전원으로 하여 입력역률개선 및 절연된 넓은 출력전압(250V_{DC}~500V_{DC}) 제어특성을 갖는 제안된 보조스위치적용 단일전력단 AC/DC 컨버터는 입력필터(L_{Fa}/L_{Fb} , C_{Fa}/C_{Fb}) 및 승압인덕터(L_{B1}/L_{B2}), 입력정류다이오드, 두 개의 공진탱크를 포함하는 하프브리지 컨버터로 구성되며 그림 1(a)에 나타냈다. 단상 AC전원의 입력역률 및 전고조파 왜형률(THD)를 개선하기 위해 단상 입력단에 필터커패시터(C_{Fa}/C_{Fb})와 필터인덕터(L_{Fa}/L_{Fb})가 연결되어 있고, 필터커패시터(C_{Fa}/C_{Fb})의 중성점을 주스위칭소자 Q_1 소스와 Q_2 드레인 사이 및 보조스위치소자(SA_1 , SA_2)의 한쪽에 연결하였다. 승압인덕터(L_{B1}/L_{B2})를 입력정류다이오드에 연결하여 보조스위치소자(SA_1 , SA_2) 및 주스위칭소자(Q_1 , Q_2)의 PWM (Pulse-Width-Modulation)에 따라 $t_0 \sim t_1$ ($t_4 \sim t_5$) 구간 주스위칭소자 Q_1 (Q_2)이 턴-온 되어 입력승압인덕터 L_{B1} (L_{B2})에 필터커패시터(C_{Fa}/C_{Fb}) 전압이 인가되고, 에너지가 축적된다. 또한 이 때 각 공진탱크에는 공진전류(I_{TP1} , I_{TP2})가 흐른다. $t_1 \sim t_2$ ($t_3 \sim t_4$) 구간 t_1 (t_5) 시점에 주스위칭소자 Q_1 (Q_2)이 턴-오프 되면 Q_1 (Q_2)의 기생출력커패시터는 충전을 하게 되고, 이와 동시에 보조스위치소자 SA_2 (SA_1)에 충전되어 있던 기생커패시터의 전압이 0전압으로 방전되어 영전압에서 보조스위치소자 SA_2 (SA_1)가 턴-온을 하면 승압인덕터(L_{B1}/L_{B2})에 축적된 에너지는 입력정류다이오드, 링크단 입력커패시터(C_1 (C_2))와 보조스위치소자(SA_1 , SA_2), 입력전원의 전류경로로 리셋되며 불연속모드로 승압 동작을 하게 된다. 또한 절연된 DC/DC컨버터를 위해 변압기(T_1 , T_2)와 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})로 구성된 두개의 공진탱크 회로부를 적용하였으며, 적용 공진탱크 회로부는 일정스위칭주파수에서 보조스위칭소자(SA_1 , SA_2) 및 주스위칭소자(Q_1 , Q_2)의 PWM제어에 따라 각 공진탱크 회로부에 V_{Link} 또는 $V_{Link}/2$ 전압이 인가되고, 2차측에 이득특성에 따른 전압이 전달된다. 따라서 제안된 보조스위치

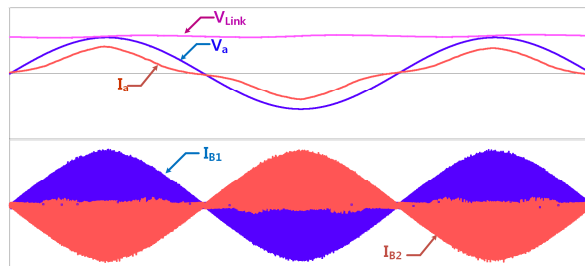
적용 단일전력단 AC/DC컨버터는 기 발표된 3레벨 AC/DC 컨버터^[2]와 달리 넓은 출력전압에 대응하기 위해 일정 스위칭주파수에서 PWM제어를 통해 링크전압(V_{Link}) 및 출력전압(V_{Bat})을 제어함으로 2차측 Battery 전압/전류를 제어할 수 있도록 구성하여 별도의 입력역률개선을 위한 PFC AC/DC컨버터 없이 단일전력단 AC/DC 컨버터로 넓은 출력전압(250V_{DC}~500V_{DC})을 제어 할 수 있다.



(a) 제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터 및 제어회로 블록도



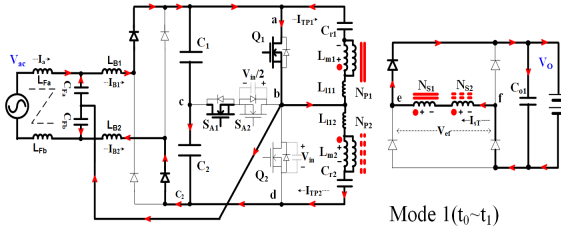
(b) 단일전력단 AC/DC 컨버터 각부 동작파형



(c)

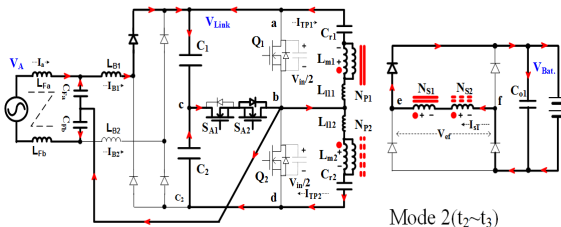
그림 1. 보조스위치 적용 단일전력단 AC/DC 컨버터 및 각부 동작파형

Mode 1 ($t_0 \sim t_1$): 동작모드 1에서는 t_0 시점에서 주스위칭소자 Q_1 가 영전압에서 턴-온 되고, 두 개의 공진탱크 회로부의 각각에 Link전압(V_{Link})이 인가되어, 2차측 출력단에 공진전류를 전달하는 구간이다. 또한 주스위칭소자 Q_1 이 턴-온 되어 있기 때문에 입력승압인덕터(L_{B1})에 필터커패시터전압(V_{CFa})이 인가되어 $C_{Fa} \rightarrow L_{B1} \rightarrow$ 입력정류다이오드 $\rightarrow Q_1 \rightarrow C_{Fb}$ (C_{Fb})의 전류경로로 흐르며 에너지를 축적하고, 입력승압인덕터(L_{B2})는 이전에 축적되어 있던 에너지가 AC입력전압과 링크전압(V_{Link}) 차 전압에 의해 감소하며 리셋 된다.



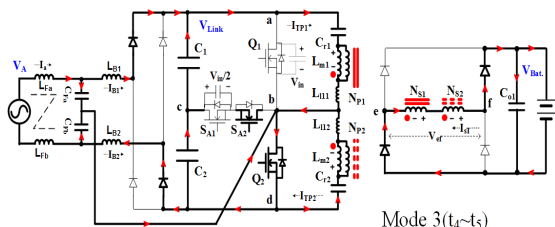
Mode 1($t_0 \sim t_1$)

Mode 2 ($t_2 \sim t_3$): t_1 시점에서 주스위칭소자 Q_1 이 턴-오프 되면 주스위칭소자(Q_1)의 기생커패시턴스는 충전되어 링크전압(V_{Link})의 1/2로 상승하고, 링크전압(V_{Link})의 1/2로 충전되어 있던 보조스위칭소자(S_{A2})의 기생커패시턴스는 0전압으로 방전 후 t_2 시점에서 영전압스위칭(ZVS) 조건에서 턴-온 된다. 따라서 동작모드 2에서는 보조스위칭소자(S_{A1} , S_{A2})를 통해 각 공진탱크회로에 링크전압(V_{Link})의 1/2이 인가되어 공진전류가 흐른다. 이때 이전 동작모드 1에서 저장된 입력 승압인덕터(L_{B1})에너지는 $C_{Fa} \rightarrow L_{B1} \rightarrow$ 입력정류다이오드 \rightarrow 커패시터(C_1) \rightarrow 보조스위칭소자(S_{A1} , S_{A2}) $\rightarrow C_{Fb}$ (C_{Fb})의 전류경로로 리셋되며 승압인덕터전류(I_{LB1})가 감소하기 시작한다.



Mode 2($t_2 \sim t_3$)

Mode 3 ($t_4 \sim t_5$): t_3 시점에 보조스위칭소자(S_{A1})이 턴-오프 되면 S_{A1} 의 기생출력커패시턴스는 링크전압(V_{Link})의 1/2로 충전되며, 주스위칭소자 Q_2 의 기생커패시터전압은 0전압으로 방전하고, t_4 시점에서 주스위칭소자 Q_2 는 영전압에서 턴-온 된다. 동작모드 3 구간에서는 주스위칭소자 Q_2 가 턴-온 되어 있으므로 각 공진탱크 회로에는 링크전압(V_{Link})이 인가되어, 2차측 출력단에 전력을 전달하는 구간이다. 또한 주스위칭소자 Q_2 가 턴-온 되어 있기 때문에 입력승압인덕터(L_{B2})는 $C_{Fb} \rightarrow Q_2 \rightarrow$ 입력정류다이오드 $\rightarrow L_{B2}$ 의 경로로 전류(I_{B2})가 흐르며 에너지를 축적하며, 이전에 리셋되며 감소하고 있는 입력승압인덕터(L_{B1}) 전류(I_{LB1})는 입력 필터커패시터전압 V_{CFa} (V_{CFb})과 링크전압(V_{Link}) 차 전압에 의해 0로 리셋 동작된다.



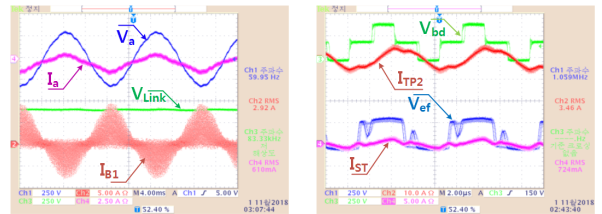
Mode 3($t_4 \sim t_5$)

3. 실험 결과

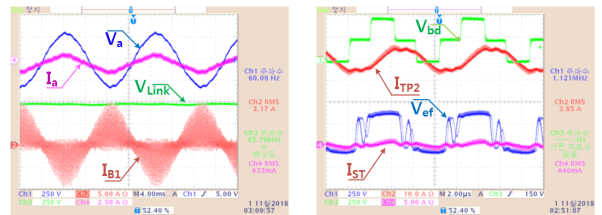
본 논문에서는 보조스위칭소자 두 개의 공진탱크회로를 갖는 2kW 단일전력단 AC/DC 컨버터의 시제품 제작 및 실험하였으며, dsPIC33FJ16GS502 16bit DSP를 사용하여 고정스위칭 주파수(120kHz)에서 PWM제어를 통해 넓은 출력전압(250V_{DC}~500V_{DC})을 제어할 수 있었다. 표 1은 적용 주회로 사양 및 측정된 변압기 파라미터이다. 그림 2와 그림 3은 출력전압(V_o) 300V_{DC} 및 450V_{DC}일 때 750W 부하조건에서 제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터의 인덕터전류(I_{LB1}), 상전압(V_a), 상전류(I_a), 링크전압(V_{Link})과 공진탱크회로의 변압기의 1차 전압/전류, 2차 전압/전류를 나타내고 있으며, 전고조파왜형률(THD)을 개선하기 위해 입력 승압인덕터가 항상 불연속으로 동작하도록 설계하였다. 모든 출력전압(300V_{DC}~450V_{DC}) 및 부하(500W~1kW) 범위에서 전고조파왜형률(THD)은 400V, 500W부하에서 12.33%로 가장 낮게 측정되었다.

표 1 주요 정격 및 변압기 파라미터

주요 정격	입력전압(V_a)		
	출력전압(V_o)/출력전류(I_{omax})	220V _{rms}	
스위칭주파수(f_s)/공진주파수(f_r)	300V _{DC} /2.5A, 450V _{DC} /1.88A (1kW)		
적용 소자	120kHz / 120.2kHz		
	주 스위칭소자($Q_1 \sim Q_2$)	SCT3030AL(650V/70A/30mΩ)	
파라미터	입력정류다이오드	GP2D050A120B[1200V/50A/1.6V/SIC]	
	2차측 출력다이오드	GP2D050A060B[600V/50A/1.45V/SIC]	
변압기 (T)	$L_a, L_b / C_{Fa}, C_{Fb} / L_{B1}, L_{B2}$	0.94mH/2.86μF/35μH	
	$C_{r1} \sim C_{r2} / C_F$	100nF/2.2μF	
변압기 (T)	1/2차측 자기인덕턴스	L_p / L_s	128.0μH/74.37μH
	등가누설인덕턴스	L_{eq}	72.36μH
	턴-수비	$n_1(N_{p1}/N_{s2})$	1.33(28T/21T)



(c) Ch1:250V/div, Ch2:5A/div, Ch3:250V/div, Ch4:2.5A/div, 4ms/div (d) Ch1:250V/div, Ch2:10A/div, Ch3:250V/div, Ch4:5A/div, 2us/div
그림 2. 입력(V_a) 220V_{rms}, 출력용량 300V_{DC}/0.75kW일 때 실험파형



(c) Ch1:250V/div, Ch2:5A/div, Ch3:250V/div, Ch4:2.5A/div, 4ms/div (d) Ch1:250V/div, Ch2:10A/div, Ch3:250V/div, Ch4:5A/div, 2us/div
그림 3. 입력(V_a) 220V_{rms}, 출력용량 400V_{DC}/0.75kW일 때 실험파형

이 논문은 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업 임 (NRF-2018R1A2B6008925)

참고 문헌

- [1] H. Wang, S. Dusmez, A. Khaligh, "A Novel Approach to Design EV Battery Chargers Using SEPIC PFC Stage and Optimal Operating Point Tracking Technique for LLC Converter", IEEE Applied Power Electronics conference and Exposition (APEC), pp. 1683 - 1689, Mar. 2014.
- [2] 마리우스, 허예창, 이강우, 이운경, 김은수, "넓은 출력 전압계 특성을 갖는 개선된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터", 전력전자학회논문집, 2017. 12. pp.147-148
- [3] 김은수, "단일전력단 교류-직류 컨버터", 특허출원예정. 2018년 12월