

넓은 출력 전압제어 특성을 갖는 개선된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터

마리우스, 허예창, 이강우, 이운경, 김은수[†]
전주대학교

An Improved Single Stage Three Level AC/DC Converter with Wide Output Voltage Control Range

Takongmo Marius, Y.C Heo, W.G Lee, U.K Lee, E.S Kim[†]
JeonJu University

1. 서론

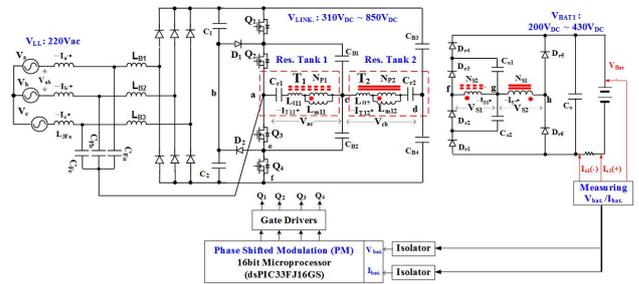
최근 개발 및 출시되고 있는 전기자동차(EV) 충전시스템은 3상 AC전원을 입력받아 입력역률개선과 고효율 AC/DC변환을 위한 Interleaved PFC컨버터, Bridgeless PFC컨버터, 3 Level 비엔나정류기(VIENNEA Rectifier) 등의 Topology가 사용되고 있으며, 변환된 DC전압을 입력받아 배터리를 충전하기 위한 절연된 고주파 DC/DC컨버터로 LLC 공진컨버터, 3레벨 컨버터 등이 사용되어 사이즈저감 및 경량화를 꾀하고 있다^[1].

본 논문은 기존 입력역률 개선을 위한 PFC 컨버터와 배터리 충전을 위한 절연형 DC/DC 컨버터 2단으로 구성되어진 충전시스템 대신에 사이즈저감 및 효율개선 그리고 넓은 범위의 출력전압제어(200Vdc~430Vdc)에 대응 할 수 있도록 '개선된 단일전력단 3레벨 하이브리드 AC/DC 컨버터'를 제안하였고^[2,3], 2kW시제품을 제작, 실험을 통해 적용 가능성을 입증하였다.

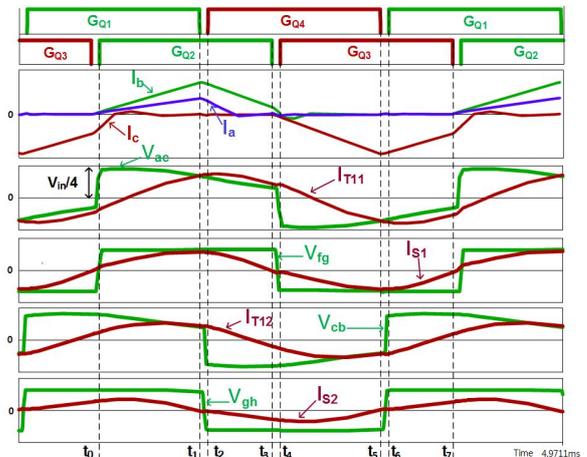
2. 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터

3상 AC전원($V_{LL}: 220V_{ac}$)을 입력전원으로 하여 입력역률개선 및 절연된 넓은 출력전압($200V_{DC} \sim 430V_{DC}$) 제어특성을 갖는 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터는 입력필터($L_{Fa} \sim L_{Fc}$, $C_{Fa} \sim C_{Fc}$) 및 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$), 입력정류다이오드, 3레벨 컨버터로 구성되며 그림 1(a)에 나타났다. 3상 AC전원의 입력역률 및 전고조파왜형율(THD)를 개선하기 위해 3상 입력단에 필터커패시터($C_{Fa} \sim C_{Fc}$)와 필터인덕터($L_{Fa} \sim L_{Fc}$)가 연결되어 있고, 필터커패시터의 중성점을 주스위칭소자 Q_2 소스와 Q_3 드레인 사이에 연결하였다. 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$)를 입력정류다이오드에 연결하여 3레벨 컨버터의 위상제어(Phase shifted Modulation)에 따라 $t_0 \sim t_1$ 구간 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 및 $t_4 \sim t_5$ 구간 Q_3 과 Q_4 는 동시에 턴 온 되어 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$)에 각각 3상 상전압이 인가되고, 에너지가 축적된다. $t_2 \sim t_3$ 구간 주스위칭소자 Q_1 이 턴 오프 되면 승압인덕터($L_{B1} \sim L_{B3}$)는 축적된 에너지를 Link 단 입력커패시터(C_1 또는 C_2)와 다이오드 D_1 , 주스위칭소자 Q_2 , 입력단 필터커패시터($C_{Fa} \sim C_{Fc}$)의 전류경로로 리셋되며 불연속 모드로 승압동작을 하게 된다. 또한 절연된 DC/DC컨버터를 위해 변압기(T_1, T_2)와 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2}), 분압커패시터($C_{B1} \sim C_{B4}$)로 구성된 2개의 공진회로부(Res. Tank 1, Res. Tank 2)를 적용하였으며, 공진회로부는 위상제어와 관계없이 50% 듀티로 교번동작을 하는 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 의 일정 스위칭주파수에 따라 공진회로부의 변압기(T_1, T_2) 2차측에 이득특성에 따른 전압이 인가된다. 2차측 정류부는 개별 정류되어 동작되지만 직렬연결 동작에 따라 전류불평형 없이 안정된 정류동작을 한다. 따라서 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC컨버터는 기 발표된 3레벨 AC/DC 컨버터와 달리 넓은 출력전압에 대응하기 위해 위상제어를 통해 입력정류단전압(V_{Link})을 제어함으로 일정스위칭주파수 제어범위에서 동작하는 3레벨 LLC 공진컨버터 2차측

Battery 전압/전류를 제어할 수 있도록 구성하여 별도의 입력역률개선을 위한 승압컨버터 없이 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터로 넓은 출력전압($200V_{DC} \sim 430V_{DC}$)을 제어 할 수 있다.



(a) 제안된 3레벨 AC/DC 컨버터 및 제어회로 블록도



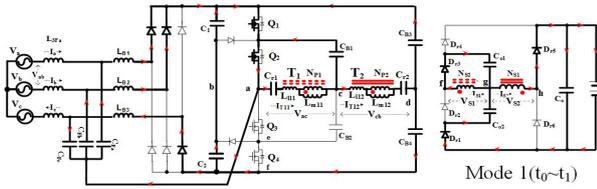
(b) 3레벨 AC/DC 컨버터 각부 동작파형

그림 1. 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터 및 각부 동작파형

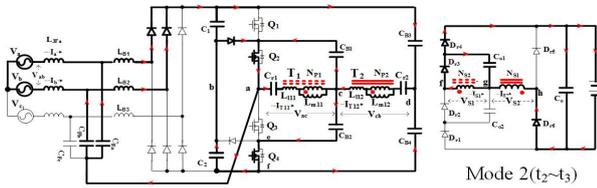
개선된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터의 동작모드는 영전압스위칭(ZVS) 동작이 일어나는 데드타임 구간 동작모드를 제외하고 기본적인 3가지 동작모드로 간단히 나타났다.

Mode 1 ($t_0 \sim t_1$) : $t_0 \sim t_1$ 구간 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 가 턴 온 되어 있으므로 LLC 공진회로부(Res. Tank 1, Res. Tank 2)에 Link전압(V_{Link})의 1/4이 각각 인가되어 공진전류가 흐르고, 2차측 출력정류부를 통해 개별적으로 공진전류가 흐르지만 2차측 직렬연결구성에 따라 전류불평형 없이 2차측 출력단에 전력을 전달한다. 또한 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 가 턴 온 되어 있기 때문에 승압인덕터(L_{B1}, L_{B2})에 입력 필터커패시터전압(V_{CFa}, V_{CFb})이 인가되어 $C_{Fa}(C_{Fb}) \rightarrow L_{B1}(L_{B2}) \rightarrow$ 입력정류다이오드 $\rightarrow Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow C_{Fa}(C_{Fb})$ 의 경로로 전류가 흐르며 에너지를 축적하고, 승압인덕터(L_{B3})는 이전에 축적되어 있던 에너지가 입력 상전압(V_o)과

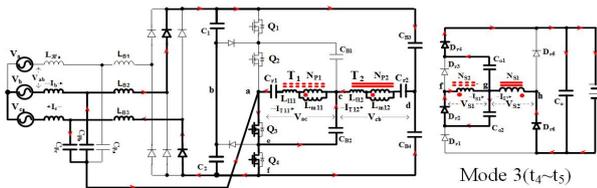
Link전압(V_{Link}) 차 전압에 의해 감소하며 리셋 된다.



Mode 2 ($t_2 \sim t_3$): t_1 시점에서 Q_1 이 턴 오프, t_2 시점에서 Q_4 가 영전압에서 턴 온 되어 $t_2 \sim t_3$ 구간 공진회로부 1(Res. Tank 1)은 이전대로 $(1/4)V_{Link}$ 전압이 인가되지만, 공진회로부 2(Res. Tank 2)는 극성이 바뀌어 $(1/4)V_{Link}$ 전압이 인가되어 2차측 출력정류부에 공진전류를 전달하며 2차측 출력단에 에너지를 전달한다. 이때 이전 Mode 1에서 저장된 입력 승압인덕터(L_{B1} , L_{B2}) 에너지는 $C_{Fa}(C_{Fb}) \rightarrow L_{B1}(L_{B2}) \rightarrow$ 입력정류다이오드 \rightarrow 커패시터(C_1) \rightarrow 순환다이오드 $\rightarrow Q_2 \rightarrow C_{Fa}(C_{Fb})$ 의 전류경로로 리셋되며 전류(I_{LB1} , I_{LB2})가 감소하기 시작한다.

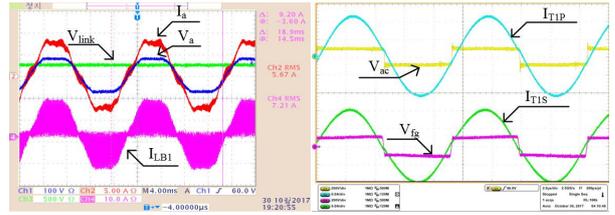


Mode 3 ($t_4 \sim t_5$): t_3 시점에서 Q_2 가 턴 오프, t_4 시점에서 Q_3 가 영전압에서 턴 온 되어 $t_4 \sim t_5$ 구간 주스위칭소자 Q_3 과 Q_4 가 턴 온 된 상태로 변압기(T_1, T_2)의 1차 권선에 Link전압(V_{Link})의 1/4이 인가되어, 2차측 출력단에 전력 전달하는 구간이다. 또한 주스위칭소자 Q_3 와 Q_4 가 턴 온 되어 있기 때문에 승압인덕터(L_{B3})는 $C_{Fc} \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_4 \rightarrow$ 입력정류다이오드 $\rightarrow L_{B3}$ 의 경로로 전류(I_{B3})가 흐르며 에너지를 축적하며, 이전에 리셋되며 감소하고 있는 입력 승압인덕터(L_{B1}, L_{B2}) 전류(I_{LB1}, I_{LB2})는 입력 필터커패시터전압 $V_{CFa}(V_{CFb})$ 과 Link전압(V_{Link}) 차 전압에 의해 0로 리셋 동작된다.

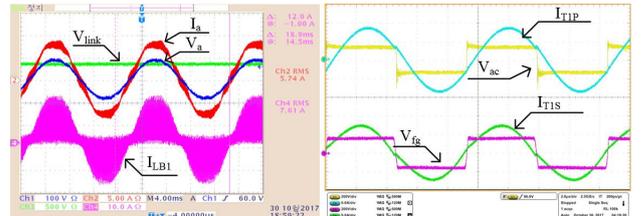


3. 실험 결과

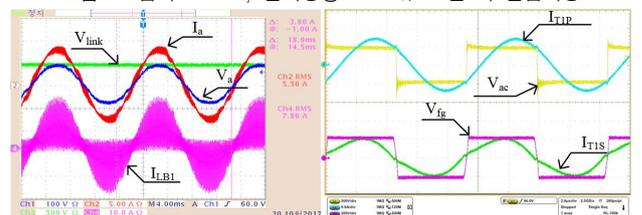
본 논문에서는 넓은 출력전압제어범위를 갖는 2kW 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터 시제품제작 및 실험하였으며, dsPIC33FJ16GS502 16bit DSP를 사용하여 고정스위칭주파수에서 위상제어를 통해 출력전압을 제어하였다. 표 1은 적용 주회로 사양 및 측정된 변압기(T_1, T_2) 파라미터이다. 그림 2부터 그림 4까지는 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터의 승압인덕터전류(I_{LB1}), 상전압(V_a), 상전류(I_a), 링크전압(V_{Link})과 변압기의(T_1) 1차 전압/전류, 2차 전압/전류를 나타내고 있으며 그림 5는 출력전압 및 부하별 효율특성과 전고조파왜형률(THD)를 나타냈다. 전고조파왜형률(THD)를 개선하기 위해 승압인덕터가 항상 불연속으로 동작하도록 설계하였고, 최대효율은 출력전압 200V_{dc} 일 때 500W 부하에서 94.4%로 측정되었고, 모든 출력전압(200V_{dc}~430V_{dc}) 및 부하(500W~2kW) 범위에서 평균효율은 91.58%로 측정되었다. 그리고 최저 전고조파왜형률(THD)은 400V, 2kW부하에서 2.35%로 가장 낮게 측정되었다.



(a) Ch1:100V/div, Ch2:5A/div, Ch3:500V/div, Ch4:10A/div, 4ms/div
(b) Ch1:200V/div, Ch2:9A/div, Ch3:200V/div, Ch4:9A/div, 2us/div.
그림 2. 입력 220Vac, 출력용량 200VDC/2kW일 때 실험파형



(c) Ch1:100V/div, Ch2:5A/div, Ch3:500V/div, Ch4:10A/div, 4ms/div
(d) Ch1:200V/div, Ch2:9A/div, Ch3:200V/div, Ch4:9A/div, 2us/div.
그림 3. 입력 220Vac, 출력용량 300VDC/2kW일 때 실험파형



(e) Ch1:100V/div, Ch2:5A/div, Ch3:500V/div, Ch4:10A/div, 4ms/div
(f) Ch1:200V/div, Ch2:9A/div, Ch3:200V/div, Ch4:9A/div, 2us/div.
그림 4. 입력 220Vac, 출력용량 430VDC/2kW일 때 실험파형

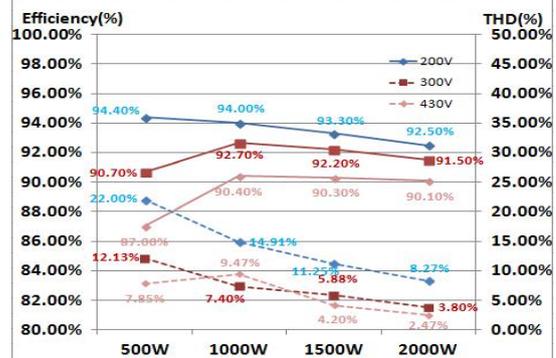


그림 5. 2kW 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터 효율 및 THD 특성

표 1 주요 정격 및 변압기 파라미터

주요 정격	입력전간전압(V_{LL})		
	출력전압(V_o)/출력전류($I_{o,max}$)	220V _{AC}	200V _{DC} /10A, 430V _{DC} /4.65A(2kW)
적용 소자	스위칭주파수(f_s)/공진주파수(f_r)	108.28kHz / 106.6kHz	
	주 스위칭소자($Q_1 \sim Q_4$)	SCT3030AL(650V/70A/30m Ω)	
	입력정류다이오드	GP2D050A120BI(1200V/50A/1.6V/SIC)	
파라미터	1차측 순환다이오드($D_1 \sim D_2$)	GP2D050A060BI(600V/50A/1.45V/SIC)	
	2차측 출력다이오드	GP2D050A060BI(600V/50A/1.45V/SIC)	
변압기 (T_1, T_2)	L_a / L_s / C_{Fa} / C_{Fb} / $L_{B1} \sim L_{B3}$	0.94mH/2.86uF/35uH	
	C_1 / C_2 / $C_{B1} \sim 4$	200nF/2.2uF	
변압기 (T_1, T_2)	1/2차측 자기인덕턴스	L_p / L_s	55.6uH/56.1uH
	등가누설인덕턴스	L_{eq}	56.1uH
	턴 수비	n_{b1} (N_{p1}/N_{s2})	1(8T/8T)

참고 문헌

[1] Xinbo Ruan, "Fundamental Considerations of Three-Level Dc-Dc Converters: Topologies, Analyses, and Control," IEEE Transactions on Circuits And Systems-I: Regular Papers, Vol. 55, No. 11, December 2008, pp 3733-3743.
 [2] 마리우스, 허예정, 이지철, 이운경, 김은수, "넓은출력전압제어 특성을 갖는 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터", 전력전자학회 하계학술대회, 2017. 07
 [3] 김은수, "단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터", 특허출원예정, 2017년 11월~12월