

넓은 출력 전압제어 특성을 갖는 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터

마리우스, 허예창, 이지철, 이운경, 김은수[†], 국윤상*
전주대학교, (파)팩테크*

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

Takongmo Marius, Y.C Heo, J.C Lee, U.K Lee, E.S Kim[†], Y.S Cook*
JeonJu University, PACTECH*

1. 서론

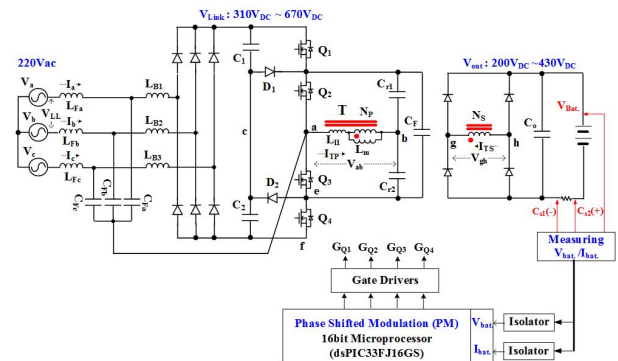
최근 개발 및 출시되고 있는 전기자동차(EV) 충전시스템은 3상 AC전원을 입력받아 입력역률개선과 고효율 AC/DC변환을 위한 Interleaved PFC컨버터, Bridgeless PFC컨버터, 3 Level 비엔나정류기(VIENNEA Rectifier) 등의 Topology가 사용되고 있으며, 변환된 DC전압을 입력받아 배터리를 충전하기 위한 절연된 고주파 DC/DC컨버터로 LLC 공진컨버터, 3레벨 컨버터 등이 사용되어 사이즈저감 및 경량화를 꾀하고 있다^[1,2].

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 '단일전력단 3레벨 하이브리드 AC/DC 컨버터'를 제안하였고^[3], 2kW 시제품을 제작하여 실험을 통해 적용 가능성을 입증하였다.

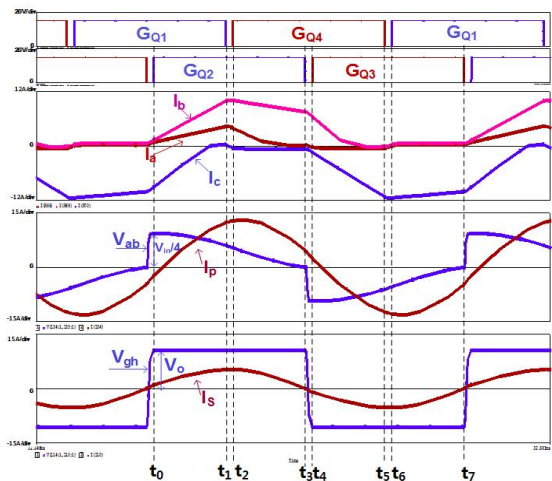
2. 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터

3상 AC전원(V_{LL} : 220V_{ac})을 입력전원으로 하여 입력역률개선 및 절연된 넓은 출력전압(200V_{DC}~430V_{DC}) 제어특성을 갖는 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터는 입력필터(L_{Fa} ~ L_{Fc} , C_{Fa} ~ C_{Fc}) 및 승압인덕터(L_{B1} ~ L_{B3}), 입력정류다이오드, 3레벨 컨버터로 구성되며 그림 1(a)에 나타났다. 3상 AC전원의 입력역률 및 전고조파왜형을 THD를 개선하기 위해 3상 입력단에 필터커패시터(C_{Fa} ~ C_{Fc})와 필터인덕터(L_{Fa} ~ L_{Fc})가 연결되어 있고, 필터커패시터의 중성점을 주스위칭소자 Q_2 소스와 Q_3 드레인 사이에 연결하였다. 승압인덕터(L_{B1} ~ L_{B3})를 입력정류다이오드에 연결하여 3레벨컨버터의 위상제어(Phase shifted Modulation)에 따라 t_0 ~ t_1 구간 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 및 Q_3 과 Q_4 는 동시에 턴 온 되어 승압인덕터(L_{B1} ~ L_{B3})에 각각 3상 상전압이 인가되고, 에너지가 축적된다. t_2 ~ t_3 구간 주스위칭소자 Q_1 (또는 Q_4)이 턴 오프 되면 승압인덕터(L_{B1} ~ L_{B3})는 축적된 에너지를 Link 단 입력커패시터(C_1 , C_2)와 정류다이오드, 입력전원, 주스위칭소자의 전류경로로 리셋 되며 불연속모드로 승압동작을 하게 된다. 또한 절연된 DC/DC컨버터를 위해 변압기T와 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2}), 플라이커패시터(C_B)로 구성된 LLC 공진회로부를 적용하였으며, 적용 공진회로부는 위상제어와 관계없이 50% 듀티로 교번동작을 하는 Q_2 , Q_3 의 일정 스위칭주파수에 따라 공진회로부 2차측에 이득특성에 따른 전압이 인가된다. 따라서 제안된 단일전력단 3레벨 AC/DC컨버터는 기 발표된 3레벨 AC/DC 컨버터와 달리 넓은 출력전압에 대응하기 위해 위상제어를 통해 정류단 전압(V_{Link})을 제어함으로써 일정스위칭주파수에서 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}~430V_{DC})을 제어 할 수 있다.



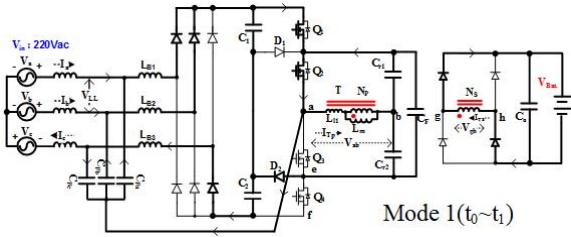
(a) 제안된 3레벨 AC/DC 컨버터 및 제어회로 블록도



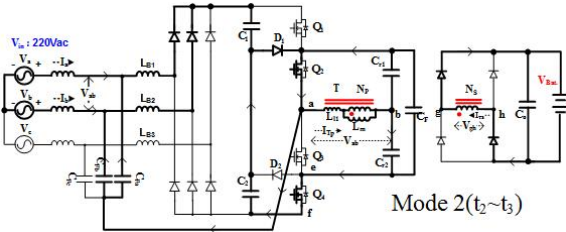
(b) 3레벨 AC/DC 컨버터 각부 동작파형

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

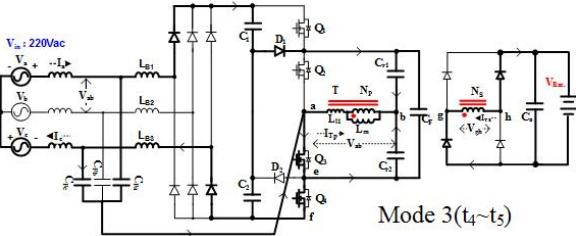
Mode 1(t_0 ~ t_1): 동작모드 1에서는 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 가 턴 온 되어 있으므로 LLC변압기 1차권선에 Link전압(V_{Link})의 1/4이 인가되어, 2차측 출력단에 전력 전달하는 구간이다. 또한 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 가 턴 온 되어 있기 때문에 입력 승압인덕터(L_{B1} , L_{B2})에 입력 필터커패시터전압(V_{CFa} , V_{CFb})이 인가되어 C_{Fa} (C_{Fb})→ L_{B1} (L_{B2})→입력정류다이오드→ Q_1 → Q_2 → C_{Fa} (C_{Fb})의 전류경로로 흐르며 에너지를 축적하고, 입력 승압인덕터(L_{B3})는 이전에 축적되어 있던 에너지가 입력 상전압(V_c)과 Link전압(V_{Link}) 차 전압에 의해 감소하며 리셋 된다.



Mode 2(t₂~t₃) : 동작모드 2에서는 주스위칭소자 Q₂와 Q₄가 턴 온 되어있어 2차측 출력단에 에너지를 전달하는 구간이다. 이때 이전 동작모드 1에서 저장된 입력 승압인덕터(L_{B1}, L_{B2})에너지는 C_{Fa}(C_{Fb})→L_{B1}(L_{B2})→입력정류다이오드→커패시터(C₁)→순환다이오드(D₇)→Q₂→C_{Fa}(C_{Fb})의 전류경로로 리셋되며 전류(I_{LB1}, I_{LB2})가 감소하기 시작한다.



Mode 3(t₄~t₅) : 동작모드 3에서는 주스위칭 소자 Q₃과 Q₄가 턴 온 된 상태로 LLC변압기의 1차 권선에 Link전압(V_{Link})의 1/4이 인가되어, 2차측 출력단에 전력 전달하는 구간이다. 또한 주스위칭소자 Q₃와 Q₄가 턴 온 되어 있기 때문에 입력 승압인덕터(L_{B3})는 C_{Fc}→Q₃→Q₄→입력정류다이오드→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.

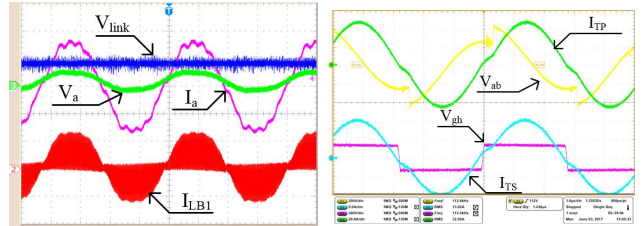


3. 실험 결과

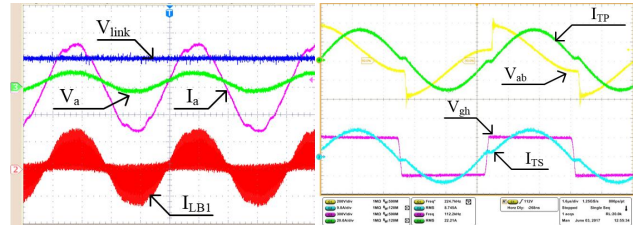
본 논문에서는 넓은 출력전압 특성을 갖는 2kW 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터의 시제품 제작 및 실험하였으며, dsPIC33FJ16GS502 16bit DSP를 사용하여 고정스위칭주파수에서 위상제어를 통해 출력전압을 제어하였다. 표 1은 적용 주회로 사양 및 측정된 변압기 파라미터이다. 그림 2부터 그림 4까지는 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터의 인덕터전류(I_{LB1}), 상전압(V_a), 상전류(I_a), 링크전압(V_{Link})과 LLC변압기의 1차 전압/전류, 2차 전압/전류를 나타내고 있으며 그림 5는 출력전압별 효율특성과 전고조파왜형률(THD)를 나타냈다. 전고조파왜형률(THD)를 개선하기 위해 입력 승압인덕터가 항상 불연속으로 동작하도록 설계하였고, 최대효율은 출력전압 200V_{dc}일 때 500W 부하에서 94%로 측정되었고, 모든 출력전압(200V_{dc}~430V_{dc}) 및 부하(500W~2kW) 범위에서 평균효율은 91.85%로 측정되었다. 그리고 최저 전고조파왜형률(THD)은 430V, 2kW부하에서 1.89%로 가장 낮게 측정되었다.

표 1 주요 정격 및 변압기 파라미터

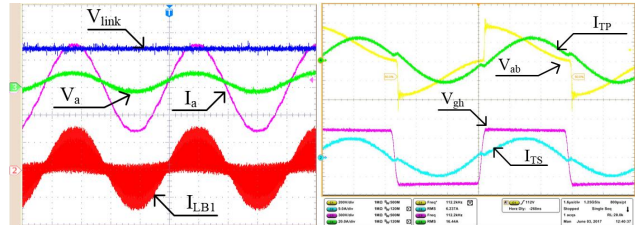
| | | |
|---------|--|--|
| 주요 정격 | 입력전압(V _{LI}) | 220V _{AC} |
| | 출력전압(V _O)/출력전류(I _{omax}) | 200V _{DC} /10A, 430V _{DC} /4.65A (2kW) |
| | 스위칭주파수(f _s)/공진수파수(f _r) | 112.8kHz / 109.8kHz |
| 적용 소자 | 주스위칭소자(Q ₁ ~Q ₄) | SCT3030AL(650V/70A/30mΩ) |
| | 입력정류다이오드 | GP2D050A120B[1200V/50A/1.6V/SIC] |
| | 1차측 순환다이오드(D ₁ ~D ₇) | GP2D050A060B[600V/50A/1.45V/SIC] |
| | 2차측 출력다이오드 | GP2D050A060B[600V/50A/1.45V/SIC] |
| 파라미터 | L _a , L _c /C _{Fa} , C _{Fb} /L _{B1} ~L _{B3} | 0.94mH/2.86uF/35uH |
| | C ₁ , C ₂ /C _F | 100nF/2.2uF |
| 변압기 (T) | 1/2차측 자기인덕턴스 | L _p /L _s 53.47uH/267.3uH |
| | 등가누설인덕턴스 | L _{eq} 10.51uH |
| | 턴 수비 | n _{pl} (N _{pl} /N _{sc}) 0.47(8T/18T) |



(a) Ch1:500V/div, Ch2:15A/div, Ch3:500V/div, Ch4:5A/div, 4ms/div (b) Ch1:200V/div, Ch2:9A/div, Ch3:300V/div, Ch4:20A/div, 1.6us/div
그림 2. 입력 220Vac, 출력용량 200VDC/2kW일 때 실험파형



(c) Ch1:500V/div, Ch2:15A/div, Ch3:500V/div, Ch4:5A/div, 4ms/div (d) Ch1:200V/div, Ch2:9A/div, Ch3:300V/div, Ch4:20A/div, 1.6us/div
그림 3. 입력 220Vac, 출력용량 300VDC/2kW일 때 실험파형



(e) Ch1:500V/div, Ch2:15A/div, Ch3:500V/div, Ch4:5A/div, 4ms/div (f) Ch1:200V/div, Ch2:9A/div, Ch3:300V/div, Ch4:20A/div, 1.6us/div
그림 4. 입력 220Vac, 출력용량 430VDC/2kW일 때 실험파형

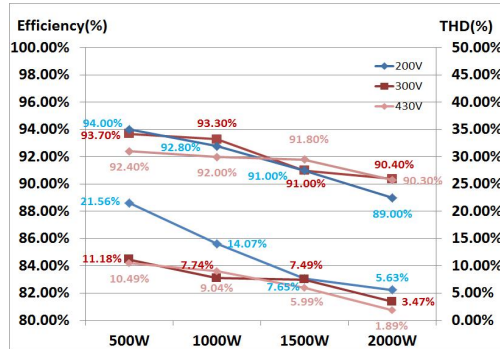


그림 5. 넓은 출력전압 특성을 갖는 2kW 단일전력단 3레벨 AC/DC 컨버터 효율 특성

참고 문헌

- [1] Peter M. Barbosa, "A Three Level Converter and Its Application to Power Factor Correction"
- [2] Xinbo Ruan "Fundamental Considerations of Three-Level DC-DC Converters: Topologies, Analyses, and Control"
- [3] 김은수, "단일전력단 3레벨 AC/DC컨버터", 특허출원예정.2017년 6~7월