

넓은 출력전압 제어 Three-Level DC/DC 컨버터

허예창, 주종성, 이지철, 김은수[†], 국윤상*
전주대학교, (주)팩테크*

Three-Level DC/DC Converter Operating in Wide Output Voltage Range

Y.C Heo, J.S Joo, J.C Lee, E.S Kim[†], Y.S Cook*
JeonJu University, PACTECH*

1. 서론

국내외적으로 전기자동차에 대한 보급 목표를 수립하고 충전인프라 구축 등 다양한 정책을 적극적으로 펼치고 있어 전기자동차 및 충전인프라 시장이 크게 확대될 것으로 전망되고 있다. 최근 개발 및 출시되고 있는 전기자동차 충전시스템은 그림 1과 같이 3상 AC전원을 입력받아 입력역률개선과 고효율 AC/DC 변환을 위한 Multiple Interleaved PFC 컨버터, Three Level 비엔나정류기 등의 토폴로지가 사용되고 있으며, 변환된 직류링크단 전압이 750V_{dc}~800V_{dc} 고전압으로 승압되기 때문에 후단에 배터리를 충전하기 위한 절연형 DC/DC 컨버터로 Three Level 위상천이 풀 브리지 DC/DC 컨버터 등이 적용, 발표되고 있다.^{[1] [3]} 하지만 다양한 종류의 배터리 팩에 대응하기 위해 넓은 출력전압제어범위(100V_{dc}~400V_{dc})를 갖는 Three Level 위상천이 풀 브리지 DC/DC 컨버터가 필요하며, 이를 위해서는 최소듀티로 동작되는 낮은 출력전압 제어범위 및 경부하시에도 영전압스위칭(Zero Voltage Switching)이 가능하여 효율을 개선시킬 수 있는 주회로가 필요하다.

본 논문에서는 넓은 출력전압(100V_{DC}~400V_{DC}) 제어에 대응할 수 있고, 모든 부하범위에서 영전압스위칭이 가능한 Three Level DC/DC 컨버터에 대하여 제안하였으며^[4], 5kW 시제품을 제작하여 실험을 통해 적용 가능성을 검증하였다.

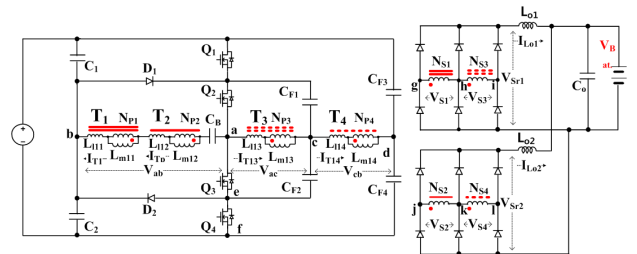


그림 1. 전기자동차 충전시스템 구성도

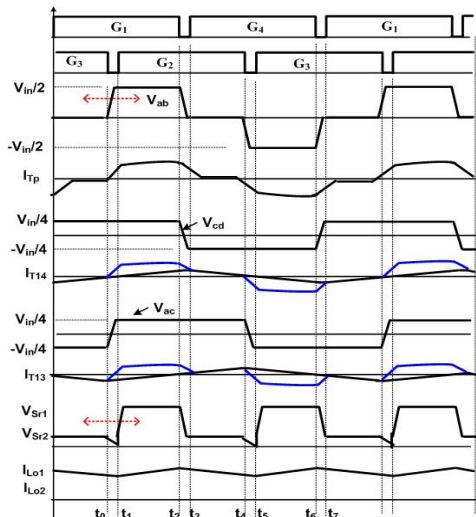
2. 넓은 출력전압 제어를 위한 Three-Level DC/DC 컨버터

제안된 Three Level DC/DC 컨버터 구성은 그림 2와 같으며, 위상천이 제어를 통해 출력단으로 에너지를 전달하는 주변압기(T₁,T₂)와 위상천이 제어와는 상관없이 항상 50% 듀티로 동작하는 보조변압기(T₃,T₄)로 구성되어 있다. 주변압기(T₁,T₂)의 1차권선(N_{P1},N_{P2})은 직렬 연결하였고 각 주변압기(T₁,T₂)의 1차권선(N_{P1},N_{P2})에 인가되는 전압은 각각 입력전압(V_{in})의 1/4전압이 인가된다. 그리고 보조변압기(T₃,T₄) 1차권선(N_{P3},N_{P4})은 주스위칭소자(Q)와 플라잉커패시터(C_F)에 하프 브리지 형태로 연결되어 있으며, 주스위칭소자(Q₁과 Q₄, Q₂와 Q₃)의 교번 동작에 따라 항상 50% 듀티로 전압이 인가되고 이때 인가되는 전압의 크기는 입력전압(V_{in})의 1/4전압이다. 2차측 회로는 주변압기(T₁)의 2차권선(N_{S1})과 보조변압기(T₃)의 2차권선(N_{S3})이 6 브리지 형태의 출력 정류다이오드에 연결된다. 마찬가지로

주변압기(T₂)의 2차권선(N_{S2})과 보조변압기(T₄) 2차권선(N_{S4})이 6 브리지 형태의 출력 정류다이오드에 연결되고, 두 개의 정류단은 병렬로 연결된다. 이때 두 개의 정류단은 주변압기(T₁,T₂)의 1차권선(N_{P1},N_{P2})이 직렬 연결되어 있기 때문에 모든 출력전압 제어범위에서 전류 불평형 없이 안정되게 동작된다.



(a) 제안된 Three-Level DC/DC 컨버터



(b) Three-Level DC/DC 컨버터 동작파형
그림 2. 제안된 Three-Level DC/DC 컨버터

본 논문에 기술한 Three Level DC/DC 컨버터는 주변압기(T₁,T₂)의 1차권선(N_{P1},N_{P2})을 직렬로 연결하여 각 주변압기(T₁,T₂)에서 감당해야할 용량을 1/2로 감소시켜 코어사이즈를 저감하였고, 보조변압기(T₃,T₄)를 연결함으로써 낮은 출력전압(V_o) 제어시 주변압기(T₁,T₂)의 출력 용량에 대한 부담을 감소시켜 주었다. 또한 기존의 Three Level 위상천이 DC/DC 컨버터의 경우 낮은 출력전압(V_o) 제어범위 시 주스위칭소자(Q₁~Q₄)의 영전압스위칭(ZVS) 동작이 되지 않던 문제를 보조변압기(T₃,T₄)를 적용하여 해결하였다. 그리고 순환구간(t₃~t₄)동안 주변압기(T₁,T₂) 1차권선(N_{P1},N_{P2})에 흐르던 순환전류는 보

조변압기(T_3, T_4)의 2차권선(N_{S3}, N_{S4})의 역바이어스 전압에 의해 주변압기(T_1, T_2) 1차권선(N_{P1}, N_{P2}) 및 2차권선(N_{S1}, N_{S2})을 통해 흐르던 출력인덕터전류(I_{L01}, I_{L02})가 보조변압기(T_3, T_4)의 2차권선(N_{S3}, N_{S4})을 통해서만 흐르므로 주변압기(T_1, T_2)의 1차측 순환 전류를 감소시켜 도통손실을 저감할 수 있었다.

3. 실험 결과

넓은 출력전압(V_o) 제어범위 $100V_{dc} \sim 400V_{dc}$ 에 대응할 수 있는 Three Level DC/DC 컨버터를 제안하고, 5kW급 시제를 제작하였다. 연구실에서 갖추고 있는 DC전원장치(2.2kW, 최대전압 $630V_{dc}$) 및 전자부하(2.5kW) 실험조건상 입력전압은 $630V_{dc}$, 부하는 2.1kW까지 실험하여 적용가능성을 검토하였다. 표 1은 실험에 적용된 주요 정격과 사용된 소자의 사양 그리고 변압기 파라미터를 나타내었다.

표 1 주요 정격 및 변압기 파라미터

주요 정격			
입력전압(V_{in})	750Vdc[630V _{dc}]		
출력전압(V_o)/출력전류(I_{omax})	100V _{dc} /50A ~ 400V _{dc} /12.5A		
적용소자			
주 스위칭소자($Q_1 \sim Q_4$)	IPW65R041CFD (650V, 43.3A, $R_{DS(on)}$: 41m Ω)		
2차 출력정류다이오드	APT30D60BHBG[C+A Common] (600V/27A/ V_F : 1.6V)		
변압기 파라미터			
플라이잉 커패시터(C_F)	2.2 μ F/750V		
출력 인덕터(L_o)	160 μ H (CM508060)		
변압기 (T_1)	1차측자기인덕턴스	L_{P1}	155.5 μ H
	2차측자기인덕턴스	L_{S1}	486.1 μ H
	등가누설인덕턴스	L_{eq1}	3.094 μ H
	턴-수비	$n1(N_{P1}/N_{S1})$	0.5625(9T/16T)
변압기 (T_2)	1차측자기인덕턴스	L_{P2}	150.9 μ H
	2차측자기인덕턴스	L_{S2}	472.2 μ H
	등가누설인덕턴스	L_{eq2}	3.09 μ H
	턴-수비	$n2(N_{P2}/N_{S2})$	0.5625(9T/16T)
변압기 (T_3)	1차측자기인덕턴스	L_{P3}	82.19 μ H
	2차측자기인덕턴스	L_{S3}	46.26 μ H
	등가누설인덕턴스	L_{eq3}	1.643 μ H
	턴-수비	$n3(N_{P3}/N_{S3})$	1.33(12T/9T)
변압기 (T_4)	1차측자기인덕턴스	L_{P4}	81.31 μ H
	2차측자기인덕턴스	L_{S4}	45.61 μ H
	등가누설인덕턴스	L_{eq4}	2.092 μ H
	턴-수비	$n4(N_{P4}/N_{S4})$	1.33(12T/9T)

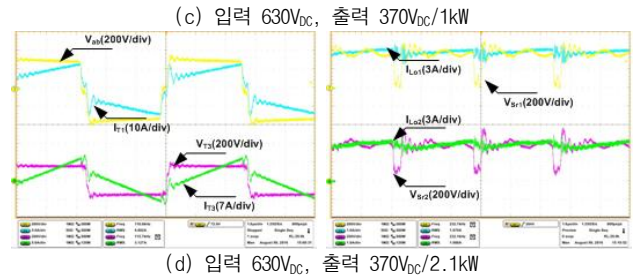


그림 3. 1차측 a-b 단자전압(V_{ab}) 및 주변압기(T_1, T_2) 1차측 전류(I_{T1}) 보조변압기(T_3)의 전압(V_{T3}), 전류(I_{T3})와 출력 정류다이오드 양단 전압(V_{Sr1}, V_{Sr2}), 출력인덕터전류(I_{L01}, I_{L02})

그림 3은 입력전압(V_{in}) 및 출력전압(V_o) $200V_{DC}, 370V_{DC}$ 일 때 1kW, 2.1kW 실험 조건에서 1차측 a b 단자전압(V_{ab})과 주변압기(T_1, T_2)의 1차측에 흐르는 전류(I_{T1}), 보조변압기(T_3) 전압(V_{T3})과 전류(I_{T3}) 그리고 출력 정류다이오드의 정류된 전압(V_{Sr1}, V_{Sr2})와 출력인덕터전류(I_{L01}, I_{L02})를 측정된 파형이다. 그리고 그림 4는 각 출력전압(V_o)에서 부하 변화에 따른 효율을 측정 한 것으로 최소 효율은 출력전압(V_o) 130V_{DC} 500W 일 때 88.9%로 측정되었고, 최대 효율은 출력전압(V_o) 370V_{DC} 일 때 97.2%로 측정되었다. 그러나 최소 듀티 동작에서 높은 피크의 주변압기(T_1, T_2) 1차측 전류로 인해 턴 오프 손실이 발생해 낮은 출력전압 제어 시 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

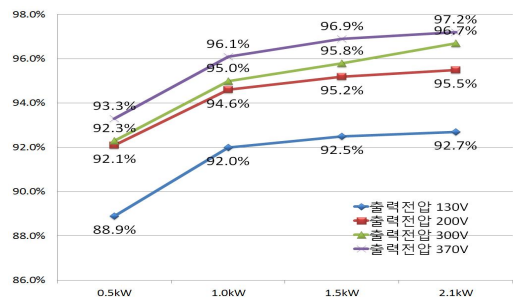


그림 4. 출력전압 및 부하 변화에 따른 효율 특성

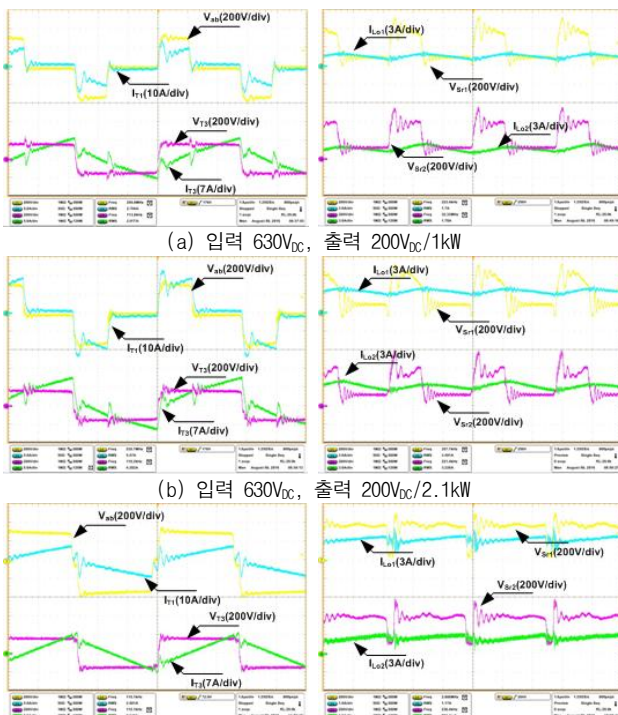
4. 결론

본 논문에서는 넓은 출력전압(V_o) 제어범위 $100V_{dc} \sim 400V_{dc}$ 에 대응할 수 있고, 보조변압기(T_3, T_4)를 적용해 낮은 출력전압(V_o) 제어 시에도 주스위칭소자($Q1 \sim Q4$)가 영전압스위칭(ZVS) 동작이 가능한 Three Level DC/DC 컨버터를 5kW급 시제를 제작해 실험을 통해 적용가능성을 검증하였다.

본 과제(결과물)는 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] 김민재, 김연우, 요스 프라보우, 최세완, "EV와 NEV 겸용 50kW 급 고효율 모듈형 급속충전기 개발" 전력전자학회 논문지 제21권 제 5호, pp.373 380, 2016.10
- [2] 허예창, 주중성, HE Malon, 강철하, 김은수, "에너지회생스너머를 적용한 하이브리드 3레벨 DC/DC 컨버터" 전력전자학회 2016년도 전력전자학술대회 논문집, pp.403 404, 2016.7
- [3] Duk You Kim, Jae Kuk Kim, Gun Woo Moon., "A Three Level Converter With Reduced Filter Size Using Two Transformer and Flying Capacitors" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 1, pp.46 53, 2013
- [4] 김은수, "넓은 입력 또는 출력전압 제어를 위한 DC/DC 컨버터", 2016년 11월 특허출원



(a) 입력 630V_{dc}, 출력 200V_{dc}/1kW

(b) 입력 630V_{dc}, 출력 200V_{dc}/2.1kW