

동작모드 변환에 따른 넓은 출력전압 제어 특성을 갖는 LLC 공진컨버터

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

LLC Resonant Converter with Wide Output Voltage Control Characteristics According to Operating Mode Transition

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

1. 서론

최근 전기자동차, 전기자동차, 전기버스 등에 다양한 종류의 배터리가 사용되고 있고, 이와 같은 다양한 종류의 배터리팩을 충전할 수 있는 넓은 출력전압제어범위(50V_{DC}~800V_{DC})를 갖는 충전시스템이 요구되고 있다. 또한 고집적화와 고효율을 위해 고주파스위칭 동작 및 모든 출력전압과 부하조건에서 영전압스위칭(ZVS)이 가능한 LLC공진컨버터가 적용 검토되고 있다^{1,2)}. 그러나 LLC 공진컨버터의 경우 모든 출력전압과 부하조건에서 영전압스위칭(ZVS)이 가능하나 넓은 출력전압(50V_{DC}~800V_{DC}) 제어에 있어 한계성을 가진다.

따라서 본 논문에서는 동작모드변환을 통해 넓은 출력전압(50V_{DC}~800V_{DC}) 제어범위에 대응이 할 수 있는 새로운 LLC 공진컨버터를 제안하였고³⁾, 3.3kW급 시제품 제작 및 실험을 통해 적용가능성을 검증하였다.

2. 동작모드 변환에 따른 넓은 출력전압 제어 특성을 갖는 LLC 공진컨버터

기존의 LLC 공진컨버터의 경우 넓은 출력전압제어를 위해서는 자화인덕턴스를 작게 설계해야한다. 하지만 출력전압(V_o) 제어범위가 50V_{DC}~800V_{DC}로 매우 넓은 범위로 제어할 경우에 기존 풀 브리지 LLC 공진컨버터로는 대응이 어렵다.

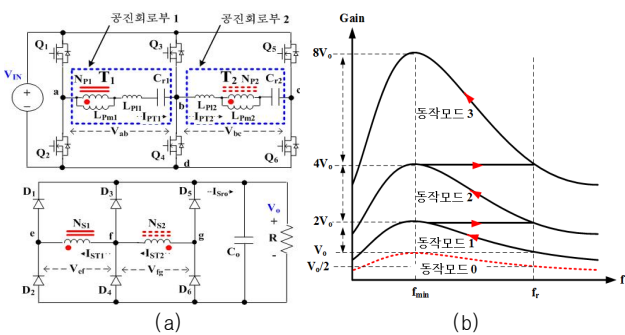


그림 1. 제안된 LLC 공진컨버터 (a) 및 입 출력전압이득특성 (b)

본 논문에서 제안된 LLC공진컨버터 회로는 그림 1(a)과 같이 1차측 주스위칭소자(Q₁~Q₆)는 6 브리지형태로 연결되어 공진변압기(T₁,T₂) 1차권선(N_{p1},N_{p2})과 공진커패시터(C_{r1},C_{r2})로 구성되며, 2차측은 6 브리지 형태로 연결되어 있는 출력정류다이오드(D₁~D₆)에 공진변압기(T₁,T₂) 2차권선(N_{s1},N_{s2})이 연결되어 있다. 이때 6 브리지 형태로 연결된 주스위칭소자(Q₁~Q₆)의 동작모드변환방식에 따라 그림 1(b)와 그림 2처럼 4가지모드로 나누어지며 각 모드별로 가변 스위칭주파수(f_s)제어를 통해 50V_{DC}~800V_{DC}로 넓은 출력전압(V_o)제어범위에 대응할 수 있다.

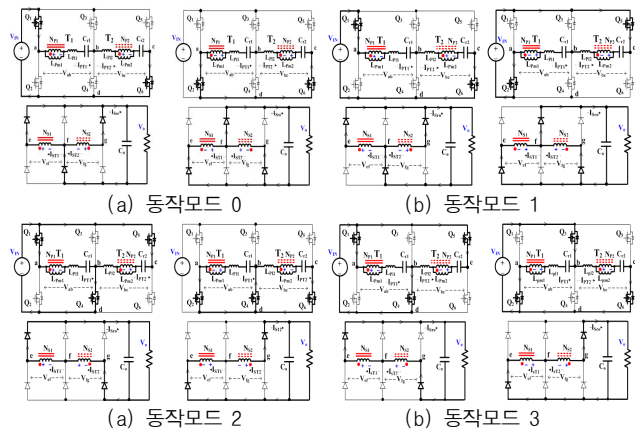


그림 2. 동작모드변환에 따른 스위칭 동작모드전류흐름도

동작모드 0에서는 주스위칭소자Q₁과 Q₂는 50%듀티로 상호교번 스위칭동작하고, Q₃,Q₄,Q₅는 턴 오프, Q₆는 턴 온 상태를 계속 유지 동작한다. 이때 1차측은 하프브리지로 동작하며 공진회로부1과 공진회로부2가 직렬 연결되어 입력전압(V_{in})의 1/4이 인가된다. 2차측은 각 공진회로부 2차권선(N_{s1},N_{s2}) 극성에 따라 출력정류다이오드(D₁~D₆)에 병렬 연결되어 공진전류(I_{ST1},I_{ST2})를 정류하며 부하에 전력 전달된다.

동작모드 1에서는 주스위칭소자 Q₃,Q₄는 턴 오프 상태이고, Q₁과Q₂ 그리고 Q₅와Q₆가 50% 듀티로 상호교번 스위칭 동작한다. 이때 Q₁과Q₆는 동시에 턴 온/턴 오프하고, 상호교번으로 Q₂와Q₅가 동시에 턴 온/턴 오프하며 풀 브리지로 동작하고 공진회로부1과 공진회로부2가 직렬 연결되어 각각 인가되는 전압은 입력전압(V_{in})의 1/2이 된다. 그리고 2차측은 변압기 2차권선(N_{s1},N_{s2})극성에 의해 출력정류다이오드(D₁~D₆)에 병렬 연결되어 공진전류(I_{ST1},I_{ST2})를 정류하여 부하에 전달된다.

동작모드 2는 Q₃는 턴 오프, Q₄는 턴 온 상태이고, Q₁과Q₂, Q₅와Q₆가 50%듀티로 상호교번 동작한다. 이때 Q₁과Q₅ 그리고 Q₂와Q₆는 동시에 턴 온/턴 오프동작 된다. 따라서 1차측은 각각 하프브리지로 동작되고, 공진회로부1과 공진회로부2는 병렬로 동작하며 입력전압(V_{in})의 1/2이 인가된다. 2차측은 변압기 2차권선(N_{s1},N_{s2}) 극성방향에 따라 출력정류다이오드(D₁~D₆)에 직렬 연결되어 공진전류(I_{ST1},I_{ST2})를 정류하며 부하에 전달한다.

동작모드 3은 주스위칭소자Q₁과Q₂, Q₃와Q₄, Q₅와Q₆가 50% 듀티로 상호교번동작하게 되고, Q₁,Q₄,Q₅와 Q₂,Q₃,Q₆가 동시에 턴 온 또는 턴 오프 동작하게 된다. 이와 같은 스위칭패턴으로 인해 1차측은 풀 브리지로 공진회로부1과 공진회로부2가 병렬로 동작하며 각각 입력전압(V_{in})이 인가되게 된다. 2차측은 변압기2차권선 극성에 따라 정류다이오드(D₁~D₆)에 직렬 연결되어 공진전류(I_{ST1},I_{ST2})를 정류하며 부하에 전달한다.

3. 실험 결과

본 논문에서는 넓은 출력전압($50V_{DC} \sim 800V_{DC}$) 제어범위에 대응하기 위해 3.3kW급 시제품 제작 및 실험을 통해 적용가능성을 검증하였다. 실험에 사용된 DC전원장치(2.2kW)용량제한에 따라 2kW까지 실험하였다. 표 1은 실험에 적용된 주요성격과 사양, 변압기 파라미터를 나타내었다.

표. 1 주요 성격 및 변압기 파라미터

주요 성격	입력전압(V_{in})	400V _{DC}	
	출력전압(V_o)/출력전류(I_o)	50V _{DC} /20A ~ 700V _{DC} /2.86A	
적용 소자	주 스위칭소자($Q_1 \sim Q_6$)	SCT3030AL(650V, 70A, R _{DS(on)} : 30m Ω , SiC)	
	2차 출력정류다이오드	GP2D050A120B(1200V, 50A, V _F : 1.6V, SiC)	
파라미터	공진 커패시터(C_{r1}, C_{r2})	22nF/3000V _{DC}	
	공진 주파수(f_r)	138kHz	
변압기(T_1/T_2)	1차측자기인덕턴스	L_{P1}/L_{P2}	127.5 μ H/130.2 μ H
	2차측자기인덕턴스	L_{S1}/L_{S2}	17.1 μ H/19.1 μ H
	등가누설인덕턴스	L_{eq1}/L_{eq2}	61.32 μ H/60.28 μ H
	권선비(Turn-ratio)	$n1(N_{P1}/N_{S1})/n2(N_{P2}/N_{S2})$	3(24T/8T)

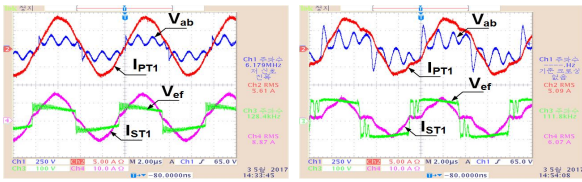


그림 3. 동작모드 0(Mode 0, 50V_{DC}~90V_{DC})에서의 실험파형

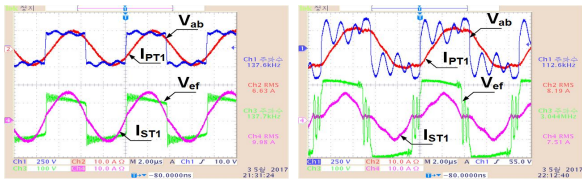


그림 4. 동작모드 1(Mode 1, 100V_{DC}~190V_{DC})에서의 실험파형

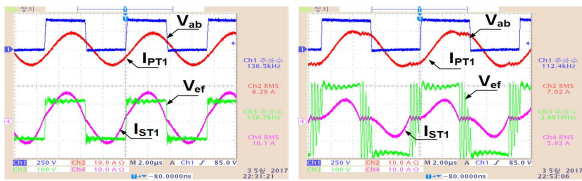


그림 5. 동작모드 2(Mode 2, 200V_{DC}~390V_{DC})에서의 실험파형

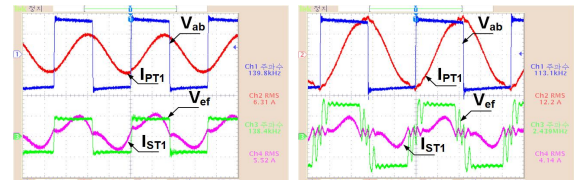


그림 6. 동작모드 3(Mode 3, 400V_{DC}~800V_{DC})에서의 실험파형

그림 3부터 그림 6은 동작모드변환 및 출력전압제어에 따른 공진변압기 T_1 의 1차권선(N_{P1}) 양단전압(V_{ab}) 및 전류(I_{PT1})와 2차권선(N_{S1}) 양단전압(V_{ef}) 및 전류(I_{ST1})를 측정된 파형이다. 그림 3은 동작모드0일 때 출력전압 50V_{DC}/90V_{DC}, 900W조건에서 측정파형으로 이득특성여유가 없어 900W까지 실험하였다.

그림 4부터 그림 6은 동작모드1과 동작모드2, 동작모드3에서 출력전압(Mode1:100V_{DC}/190V_{DC}, Mode2:200V_{DC}/390V_{DC}, Mode3:400V_{DC}/800V_{DC}) 및 2kW 부하조건에서 측정된 파형이다.

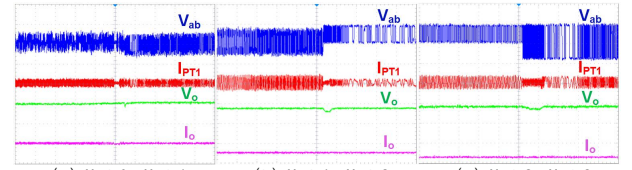


그림 7. 모드변환에 따른 변압기 1차전압/전류 및 출력전압/전류파형

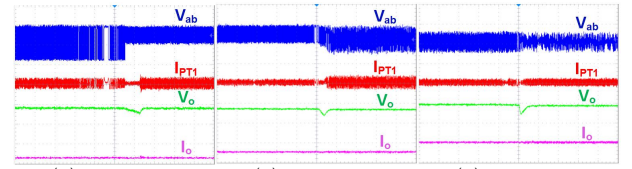


그림 8. 모드변환에 따른 변압기 1차전압/전류 및 출력전압/전류파형

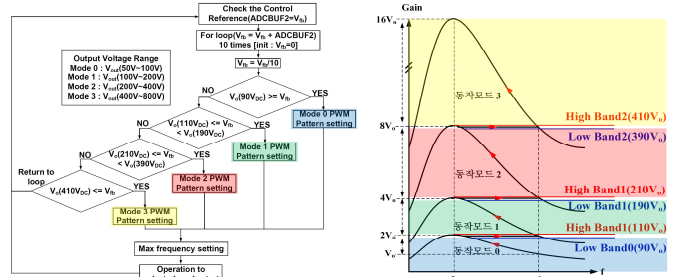


그림 9. 동작모드변환을 위한 제어프로그램 및 이득제어

그림 7은 하위모드에서 상위모드로 변환될 때 공진변압기 T_1 1차권선(N_{P1}, N_{P2})의 양단전압(V_{ab})과 전류(I_{PT1}), 출력전압(V_o)과 출력전류(I_o)를 측정된 것으로 동작모드변환은 출력전압(V_o)이 110V_{DC} 이상일 때는 동작모드 0에서 동작모드 1로 변환되고, 출력전압(V_o) 210V_{DC} 이상에서는 동작모드 1에서 동작모드 2로 변환되며, 출력전압(V_o) 410V_{DC} 이상일 때는 동작모드 2에서 동작모드 3으로 변환 된다.

그림 8은 상위모드에서 하위모드로 변환될 때에 측정파형으로 출력전압(V_o)이 390V_{DC} 이하로 내려갈 경우 동작모드 3에서 동작모드 2로 변환되고, 출력전압(V_o)이 190V_{DC} 이하일 경우에는 동작모드 2에서 동작모드 1로 변환되며, 출력전압(V_o)이 90V_{DC} 이하에서는 동작모드 1에서 동작모드 0으로 변환된다. 그림 9에 나타낸바와 같이 동작모드변환을 위한 밴드폭을 두어 안정된 동작모드변환이 이루어지도록 프로그램 제어된다. 모든 출력전압 및 부하에서 최대효율은 동작모드2에서 출력전압(V_o) 300V_{DC}에 1.5kW 부하 조건에서 96.42%로 측정되었고, 모든 출력전압 및 2kW 부하조건에서는 최대효율은 동작모드2에서 출력전압(V_o) 200V_{DC}, 300V_{DC}일 때 95.93%로 측정되었다.

「본 연구는 2017년도 산림통상자원부의 지원 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(NO.20172020108500)입니다.」

참고 문헌

- [1] Haibing Hu, Xiang Fang, Oian Zhang, Z. John Shen, Issa Batarseh, "Optimal Design Considerations for a Modified LLC Converter with Wide Input Voltage Range Capability Suitable for PV Applications", 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp.3096-3103, 2011.11
- [2] Milan M. Jovanovic, Brian T. Irving, "On-the-Fly Topology-Morphing Control-Efficiency Optimization Method for LLC Resonant Converters Operating in Wide Input-and/or Output-Voltage Range", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 3, pp.2596-2608, 2015.6
- [3] 김은수, "넓은 입력 전압 범위 또는 넓은 출력 전압 범위에서 동작하는 LLC 공진 컨버터", 2016년 11월 10일 특허출원번호 10-2016-0149290