

넓은 입·출력 전압이득 특성을 갖는 LLC 공진컨버터

유상재, 장기찬, 우정원, 김은수[†], 국윤상*
 전주대학교, (주)팩테크*

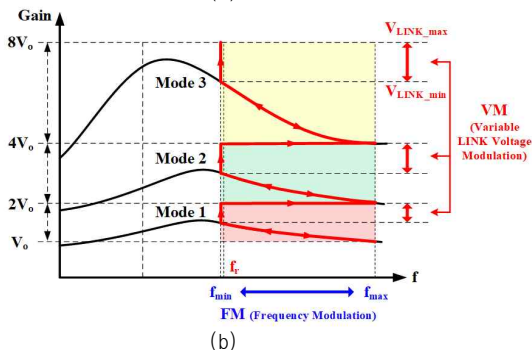
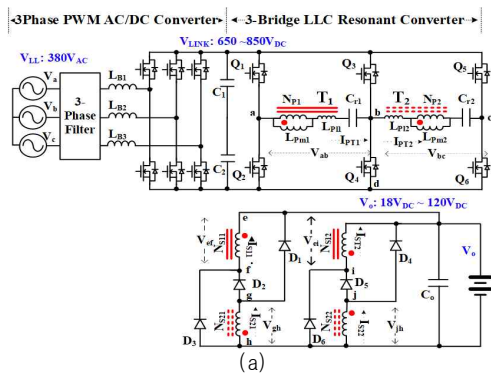
A LLC Resonant Converter with Wide Input/Output Voltage Gain Characteristics

S.J Yoo, K.C Jang, J.W Woo, E.S Kim, Y.S Kook
 JeonJu University, Pactech Co., Ltd.

1. 서 론

각종 산업분야에서 사용되는 전기지게차, 전동차량과 같은 전기이송장치(E-mobility) 사용이 최근 들어 확대 적용되고 있다. 각 적용기기별 배터리 셀(cell)수에 따라 정격전압 24V_{DC}/36V_{DC}/48V_{DC}/96V_{DC}이 다양한 배터리가 사용되고 있으며, 이처럼 다양한 배터리 충전전압을 단일 충전전원장치로 전력공급할 수 있는 DC/DC 컨버터가 요구되고 있다.^[1]

이를 위해 최근 영전압스위칭이 가능하며 고집적화에 적합한 LLC 공진컨버터가 적용 검토되고 있고, 하프-브리지(Half-bridge)/풀-브리지(Full-bridge) 동작모드변환을 통해 보다 넓은 출력전압제어범위를 얻기 위한 LLC 공진컨버터가 발표되고 있다.^[2] 하지만, 이러한 LLC 공진컨버터의 경우 4배 이상 전압제어범위를 갖고 동작할 수 없으며, 특히 수 kW까지 용량 증가 시 각 동작모드별 넓은 출력전압제어범위를 갖기 위해서는 변압기자화인덕턴스를 작게 설계하여 원하는 제어범위를 가지고 동작할 수 있도록 하여야 하지만 변압기자화인덕턴스가 저감되면 변압기 자화전류 증가로 인해 도통손실과 권선손실이 증가하여 충전시스템 효율개선에 어려움을 준다.



1. (a) 제안된 충전시스템주회로도 및 (b) FM/VM 이득제어개념도

본 논문에서는 다양한 배터리에 대응 충전할 수 있도록 그림 1에 나타낸 것처럼 3-브리지 LLC 공진컨버터의 스위칭동작 패턴에 따라 3가지 동작모드(Mode 1, Mode 2, Mode 3)로 나누어 동작되고, 변압기자화인덕턴스(L_{Pm1} , L_{Pm2})를 크게 줄이지 않으면서, 각 동작모드의 제어범위에 맞는 배터리 충전 전압/전류를 제어할 수 있도록 가변스위칭주파수제어(FM) 및 가변링크전압제어(VM)를 접목한 충전전원장치를 제안하였으며, 정격용량 5kW/50A(최대정격 6.2kW/50A) 시제품을 제작하여 실험 검증하였다.

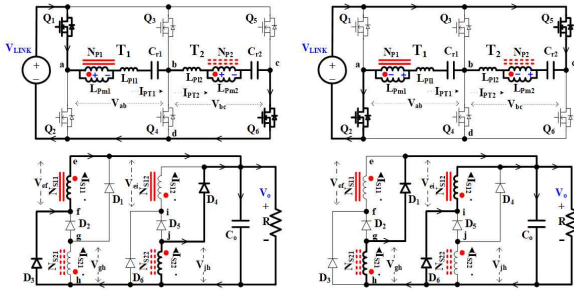
2. 본 론

2.1 동작모드 변환과 FM/VM 제어를 통한 넓은 출력 전압 이득특성을 갖는 3-브리지 LLC 공진컨버터

본 논문에서는 다양한 배터리에 대응할 수 있고, 넓은 출력 전압제어범위(18V_{DC}~123V_{DC})를 확보하기 위해 제안된 3-브리지 LLC 공진컨버터는 그림 1 (a)과 같이 가변링크전압(V_{LINK}) 제어할 수 있는 3상 PWM AC/DC 컨버터와 함께 3-브리지 암의 주스위칭소자 $Q_1 \sim Q_6$ 가 배치되고, Q_1 의 Source와 Q_2 의 Drain 사이와 Q_3 의 Source와 Q_4 의 Drain 사이와 Q_5 의 Source와 Q_6 의 Drain 사이에 변압기 T_1 의 1차측(N_{P1})과 공진캐패시터 C_{r1} 의 양단이 연결되며, Q_3 의 Source와 Q_4 의 Drain 사이와 Q_5 의 Source와 Q_6 의 Drain 사이에 변압기 T_2 의 1차측(N_{P2})과 공진캐패시터 C_{r2} 의 양단이 연결되어 1차측이 전체적으로 2개의 공진회로로 구성된다. 또한, 변압기 T_1 과 T_2 의 2차측이 센터탭으로 이루어져 있어, 정류다이오드 $D_1 \sim D_6$ 가 변압기 2차측권선 전압극성에 따라 직렬 또는 병렬로 연결되어 공진전류의 흐름을 제어하며 입·출력전압 이득을 제어한다.^[3] 각 동작모드(Mode 1, Mode 2, Mode 3)는 1차측 주스위치의 스위칭 동작패턴에 따라 1차측 회로가 하프-브리지 또는 풀-브리지 동작과 직·병렬회로 구성에 의해 각 공진회로내의 변압기 T_1 과 T_2 1차측에 인가되는 전압을 제어하고, 이에 따라 변압기 각 2차측권선 전압극성에 따라 병렬 및 직렬 연결되어 동작하고, 부하로 전력전달 된다. 이처럼 각 동작모드에 따라 그림 1 (b)와 같이 3가지 입·출력전압 이득특성으로 동작하게 되며, 각 동작모드(Mode 1, Mode 2, Mode 3)에서 주 스위칭소자의 스위칭동작주파수를 가변 제어함(FM)으로써 LLC 공진컨버터가 출력전압을 제어하고, 공진주파수(f_r) 바로아래의 최소동작주파수(f_{min})에 도달 시 기존 650V_{DC} 일정전압으로 제어되고 있는 3상 PWM AC/DC 컨버터가 출력링크전압(V_{LINK})을 650V_{DC}~850V_{DC}로 가변 제어(VM)하며 출력전압을 보다 넓은 제어범위로 가변 동작한다.

2.2 각 동작모드 별 스위칭 동작패턴과 특성

2.2.1 동작모드 1 (Mode 1)



2. 동작모드 1 동작전류

동작모드 1 : 1차측 주 스위칭소자 Q_1 과 Q_6 가 매 주기 내에서 50% 듀티로 동시에 턴-온/턴-오프 되고, Q_2 와 Q_5 또한 50% 듀티로 동시에 턴-오프/턴-온 되어 서로 상호교번 동작함으로써 풀-브리지로 동작한다. 따라서 공진회로 1과 공진회로 2가 직렬 연결되어 동작되고, 각 공진회로에 링크전압(V_{LINK})의 1/2이 인가된다. 이때 각 공진회로의 변압기 2차측 권선은 서로 반대전압극성으로 인가되어 변압기 T_1 과 T_2 2차측권선이 서로 병렬 연결되어 정류다이오드 D_3/D_4 와 D_1/D_6 에 각각 정류되며 공진전류가 흐른다. 따라서 가변스위칭주파수(FM) 및 가변링크전압(VM) 제어에 의해 $V_o \sim 2V_o$ 로 제어가 가능하다.

2.2.2 동작모드 2 (Mode 2)

동작모드 2 : 1차측 주스위칭소자 Q_1 과 Q_5 가 턴-오프 되어 있고, Q_2 와 Q_6 는 턴-온 되어있는 상태에서 Q_3 와 Q_4 가 50% 듀티로 서로 상호교번 스위칭 동작함으로써 공진회로 1과 공진회로 2가 병렬 연결되어 하프-브리지로 동작한다. 이에 따라 1차측 각 공진회로에 링크전압(V_{LINK})의 1/2이 인가되고, 변압기 T_1 과 T_2 2차측은 권선전압 극성이 바뀌어 2차측 권선이 직렬 연결되고, 정류다이오드 D_5 와 D_2 를 통해 각각 공진전류가 흐르게 된다. 따라서 변압기 T_1 과 T_2 의 2차측 전압의 합전압($V_{e1}+V_{j1}$, $V_{e2}+V_{j2}$)이 부하단에 전력전달 된다. 이에 따라 가변스위칭주파수(FM) 및 가변링크전압(VM) 제어에 의해 출력전압 $2V_o \sim 4V_o$ 로 제어가 가능하다.

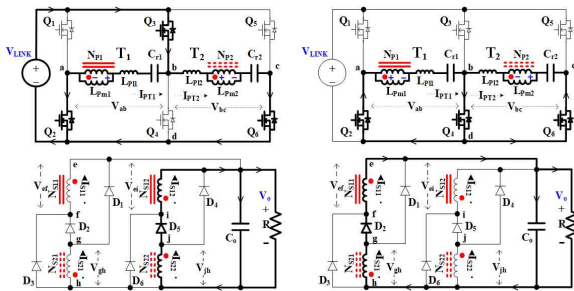


그림 3. 동작모드 2 동작전류

2.2.3 동작모드 3

동작모드 3 : 1차측 주스위칭소자 $Q_1/Q_4/Q_5$ 가 50% 듀티로 동시에 턴-온/턴-오프 동작되고, $Q_2/Q_3/Q_6$ 또한 50% 듀티로 동시에 턴-오프/턴-온 동작되며, 서로 상호교번 스위칭동작하고, 풀-브리지로 동작하며, 공진회로 1과 공진회로 2는 병렬 연결되어 동작되어 각 공진회로에 각각 링크전압(V_{LINK})이 인가된다. 이와 동시에 각 공진회로의 변압기 T_1 과 T_2 2차측은 서로 반대방향의 전압극성으로 인해 동작모드 2와 동일하게 변압기 T_1 과 T_2 의 2차측 전압의 합전압($V_{e1}+V_{j1}$, $V_{e2}+V_{j2}$)이 부하단에 전력전달 된다. 따라서 가변스위칭주파수(FM) 및 가변링크전압(VM) 제어에 의해 출력전압 $4V_o \sim 8V_o$ 로 제어가 가능하다.

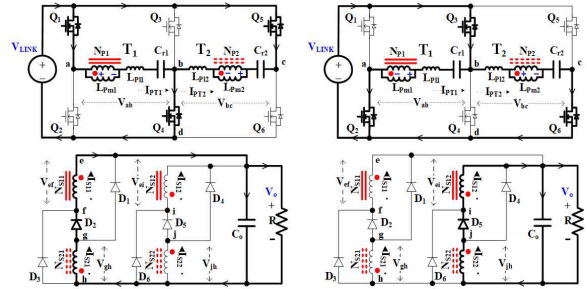


그림 4. 동작모드 3 동작전류

2.3 3-브리지 LLC 공진컨버터 이득특성

그림 5에 나타낸 바와 같이 넓은 입·출력전압 이득특성을 갖는 LLC 공진컨버터를 제어하기 위해서는 동작모드변환을 통해 전체적인 이득범위를 결정하고, 각 동작모드에서 LLC 공진컨버터의 이득특성($G_v = V_o/V_{LINK}$)에 따라 주스위칭소자의 스위칭 동작주파수를 가변하여 입·출력전압 이득제어를 수행한다. 또한, 각 동작모드의 최소스위칭주파수(f_{min})를 공진주파수(f_r) 바로 아래로 설정하고, 스위칭주파수가 최소스위칭주파수(f_{min})에 이르게 되면 해당 동작주파수(f_{min})로 고정되고, 3상 PWM AC/DC 컨버터의 출력전압인 링크전압(V_{LINK})을 가변 제어함으로써 출력전압을 보다 넓은 출력전압범위로 제어할 수 있다. 그림 5는 Mathcad 시뮬레이션을 통해 각 동작모드 정격전압에서 10A 및 50A 출력전류 기준, 입·출력전압 이득특성으로 각 동작모드별로 최대스위칭주파수(f_{max}) 350kHz에서 최소스위칭주파수(f_{min}) 149kHz까지 제어하는 가변스위칭주파수(FM) 제어 구간과 링크전압(V_{LINK})을 650V_{DC}에서 850V_{DC}까지 가변하는 가변링크전압(VM) 제어구간으로 나누어 제어된다.

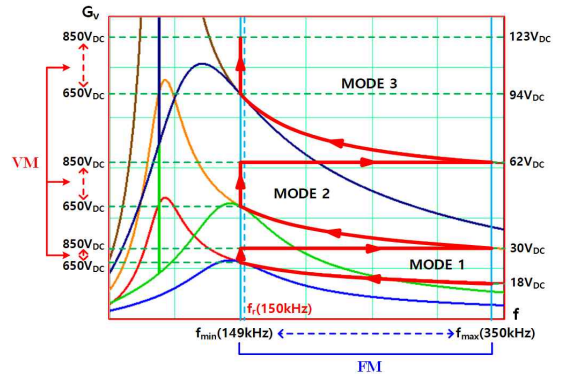


그림 5. 동작모드별 이득특성 곡선

3. 실험 결과

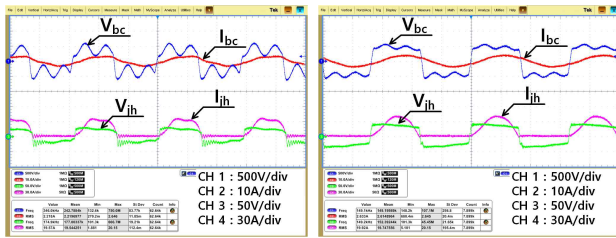
표 1 3-브리지 LLC 공진컨버터 입출력사양 및 적용 소자

Major ratings	Link voltage(V_{LINK})	650V _{DC} ~850V _{DC}
	Output Voltage(V_o)/ Output current(I_o)	18V _{DC} /50A ~ 123V _{DC} /50A
Device	Switching elements ($Q_1 \sim Q_6$)	UJ3C120040K3S (1200V,65A,35m Ω ,SiC)
	Output diodes (D_1,D_3,D_4,D_6)/(D_2,D_5)	UJ3D06560KS/ UJ3D06560KS*2 (650V,60A, V_F :1.5V,SiC)

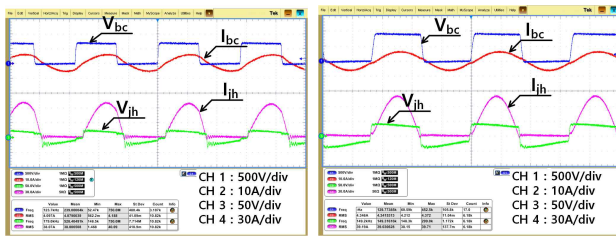
본 논문에서는 동작모드 변환과 가변스위칭주파수(FM) 및 가변링크전압(VM) 제어를 통해 넓은 출력전압제어범위를 갖는 LLC 공진컨버터를 정격용량 5kW/50A의 시제품 제작 및 실험을 진행하여 가능성을 검토하였다. 이에 대한 사양 및 측정 주요 파라미터는 표 1과 표 2에 나타났다.

2 공진회로의 주요 파라미터

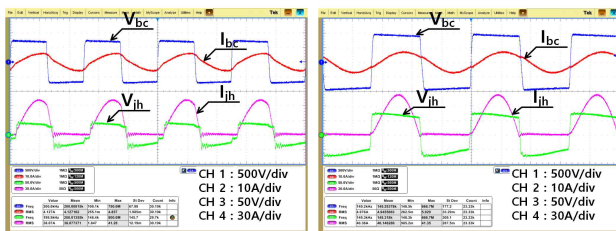
Parameters	Resonant capacitors(C_{r1}, C_{r2})	7.33nF	
	Resonant frequency (f_r)	150kHz	
Transformer (T_1)	Primary inductance	L_{P1}	487.2uH
	Secondary inductance	L_{S1}	1.813uH
	Equivalent leakage inductance	L_{eq1}	152.1uH
	Turn-ratio	$N_1(N_{P1}/N_{S1})$	18(36/2)
Transformer (T_2)	Primary inductance	L_{P2}	479.6uH
	Secondary inductance	L_{S2}	1.830uH
	Equivalent leakage inductance	L_{eq2}	154.2uH
	Turn-ratio	$N_2(N_{P2}/N_{S2})$	18(36/2)



(a) $V_{LINK}/V_o/I_o$ 650V_{DC}/18V_{DC}/50A (b) $V_{LINK}/V_o/I_o$ 850V_{DC}/30.2V_{DC}/50A
 그림 6. MODE 1 최소/최대전압(18V_{dc}/30.2V_{dc}), 50A 정전류 동작시 실험파형 [CH1:500V/div, CH2:10A/div, CH3:50V/div, CH4:30A/div]



(a) $V_{LINK}/V_o/I_o$ 650V_{DC}/30V_{DC}/50A (b) $V_{LINK}/V_o/I_o$ 850V_{DC}/60V_{DC}/50A
 그림 7. MODE 2 최소/최대전압(30V_{dc}/60V_{dc}), 50A 정전류 동작시 실험파형 [CH1:500V/div, CH2:10A/div, CH3:50V/div, CH4:30A/div]



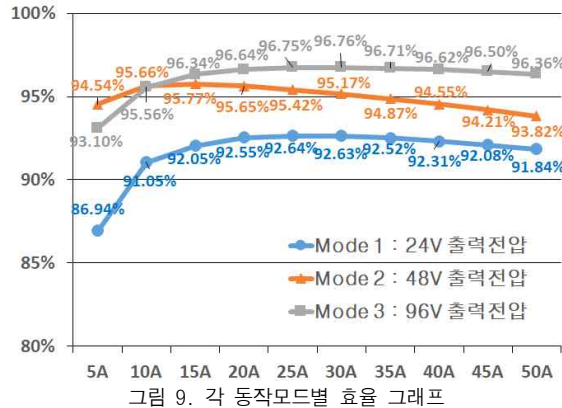
(a) $V_{LINK}/V_o/I_o$ 650V_{DC}/62V_{DC}/50A (b) $V_{LINK}/V_o/I_o$ 850V_{DC}/123V_{DC}/50A
 그림 8. MODE 3 최소/최대전압(62V_{dc}/123V_{dc}), 50A 정전류 동작시 실험파형 [CH1:500V/div, CH2:10A/div, CH3:50V/div, CH4:30A/div]

가변링크전압제어(VM)를 위해서 3상 PWM AC/DC 컨버터 링크전압(V_{LINK})을 제어하는 것 대신에 DC 전원장치(Keysight/N8950A/1000V/30A/10kW)를 사용하여 링크전압을 650V_{DC}~850V_{DC}까지 가변하였다. 표 2의 공진회로인 변압기 등가순인덕턴스(L_{eq})와 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})를 토대로 공진주파수(f_r)는 150kHz로 설정하고, 가변링크전압제어가 동작개시되는 최소스위칭주파수(f_{min})를 공진주파수(f_r) 바로아래 주파수영역에서 동작하도록 149kHz로 제한하였다.

그림 6과 그림 7 및 그림 8은 각 동작모드별 실험파형으로 측정포인트는 공진회로 2의 1차측 단자전압(V_{bc})과 전류(I_{bc}), 공진회로 2의 2차측 단자전압(V_{jh})과 전류(I_{jh})이다. 그림 6 (a)는 동작모드 1 조건에서 정격출력전류 50A일 때 최소출력전압

18V_{DC} 제어시 900W 출력용량 실험파형으로 이때 효율은 89.64%이다. 그림 6 (b)는 동작모드 1에서 최대출력전압 30.2V_{DC} 및 정격출력전류 50A 동작조건에서 최소스위칭동작주파수(f_{min}) 및 링크전압(V_{LINK}) 850V_{DC}에서 동작시 1.51kW 출력용량의 실험파형으로 효율은 92.81%였다. 그림 7 (a)는 동작모드 2에서 최소출력전압 30V_{DC}/정격출력전류 50A 제어시 1.5kW 출력용량의 실험파형으로 효율은 90.16%이다. 또한 그림 7 (b)는 동작모드 2에서 정격출력전류 50A, 최소스위칭동작주파수(f_{min})에서 링크전압을 850V_{DC}로 가면서 최대전압 60V_{DC} 3kW 출력용량 실험파형이며, 효율은 95.06%이다. 그림 8 (a)는 동작모드 3에서 최소출력전압 62V_{DC}/정격출력전류 50A 제어시 3.1kW 출력용량 실험파형으로 효율은 94.24%이다. 그림 8 (b)는 동작모드 3에서 정격출력전류 50A, 최소스위칭동작주파수(f_{min}) 및 링크전압(V_{LINK})을 850V_{DC}로 가면서 최대전압 123V_{DC} 6.15kW 출력용량 실험파형이며, 효율은 96.53%였다.

그림 9는 각 동작모드별로 적용되는 배터리 정격전압조건 (24V_{dc}/48V_{dc}/96V_{dc})에서 동작모드별 효율특성으로 동작모드 1에서 최대효율은 링크전압(V_{LINK}) 667V_{DC}/출력전압 24V_{DC}/출력전류 25A 조건에서 92.64%를 보였다. 동작모드 2에서 최대효율은 입력전압 660V_{DC}/출력전압 48V_{DC}/출력전류 15A 조건에서 95.77%를 보였다. 동작모드 3에서 최대효율은 입력전압 654V_{DC}/출력전압 96V_{DC}/출력전류 30A 조건에서 96.76%를 보였다.



본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원 한국에너지기술평가원(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, pp3096-3103, 2011.11
- [2] Milan M. Jovanovic, Fellow, IEEE, and 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", 2016 IEEE Transactions on Power Electronics, p.2596-2608, 2015.06
- [3] 김은수, "넓은 입력 전압 범위 또는 넓은 출력 전압 범위에서 동작하는 LLC 공진 컨버터", 특허등록 1018376030000(2018.03.06.)