

보조권선 적용 양방향 LLC 공진컨버터

오재성, 이준환, 유경중, 한경훈, 김은수[†]
 전주대학교

Bidirectional LLC Resonant Converter using Auxiliary windings

J.S Oh, J.H Lee, K.J Yoo, K.H Han, E.S Kim,[†]
 JeonJu University

1. 서론

최근 마이크로그리드, 에너지저장시스템(ESS), 전기자동차 충·방전시스템 등 응용분야에서 양방향 직류-직류(DC-DC) 컨버터 전력변환장치가 요구되고 있다. 이를 위해 고효율, 고집적화가 가능한 CLLC 공진컨버터가 접목된 양방향 DC-DC 컨버터가 연구 검토되고 있다 [1],[2]. 하지만 그림 1과 같이 양방향 CLLC 공진컨버터의 경우 순방향 및 역방향 동작시 1, 2차측 공진커패시터(C_r , C_R)의 상호커플링에 따라 LLC 및 CCL 공진 특성을 가지게 되어 공진주파수 아래의 주파수영역에서 이득개선이 되지 않아 전압이득제어가 매우 어려워 변압기 자화인덕턴스를 저감시켜 이득을 개선할 수 있지만, 자화전류증가로 인해 도통손실이 증가하여 효율개선이 어렵다. 이를 위해 양방향 CLLC 공진컨버터와 양방향 승·강압(Buck/Boost) 컨버터를 접목한 2단 구성의 양방향 DC-DC 컨버터가 적용되고 있다 [3]. 하지만 2단 구성 양방향 DC-DC 컨버터의 경우 고효율, 고집적화의 한계성이 있다. 따라서 본 논문은 별도의 승·강압(Buck/Boost) 컨버터를 추가하지 않고 입·출력 이득특성을 개선할 수 있는 양방향 LLC 공진컨버터를 제안하였다 [4].

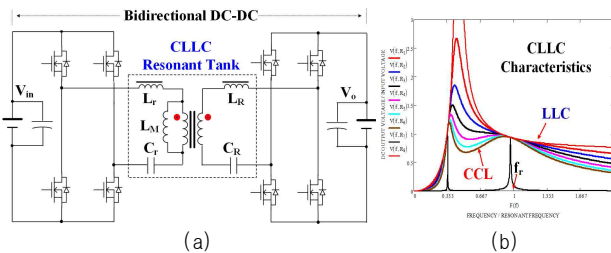


그림 1. (a) 양방향 DC-DC 컨버터, (b) CLLC 공진 이득특성

2. 본론

2.1 보조권선 적용 양방향 LLC 공진컨버터

그림 2(a)와 그림 2(b)에 나타난 제안된 양방향 LLC 공진컨버터는 1차측 및 2차측에 공진커패시터(C_{r1}/C_{r2} , C_{R1}/C_{R2})가 적용된다 할지라도 순방향 및 역방향 스위칭 동작시 변압기 1, 2차측 권선 전압극성에 따라 공진전류(순방향 동작시 I_{S1}/I_{S2} , 역방향 동작시 I_{P1}/I_{P2})가 공통연결선을 통해 우회하여 흐르므로 공진커패시터(C_{r1}/C_{r2} , C_{R1}/C_{R2})는 상호커플링 되지 않고 동작하여 그림 2(c)에 나타난 LLC 고유의 공진이득특성을 갖고 동작한다. 하지만 순방향 및 역방향 전력전달에 있어 동작 특성상 전압이득 차이가 존재하여 배터리 충·방전을 위해서는 어느 정도 이득조절이 필요하다. 이를 위해서는 배터리 충·방전전압에 대응 할 수 있도록 그림 2(a)와 그림 2(b), 그림 2(c)에 나타난

바와 같이 각 변압기 1차측 주권선(N_{P1} , N_{P2})에 보조권선(N_{P11}/N_{P21} , N_{P12}/N_{P22})을 적용하여 그림 2(c)에 나타난 것처럼 이득조절이 필요하다.

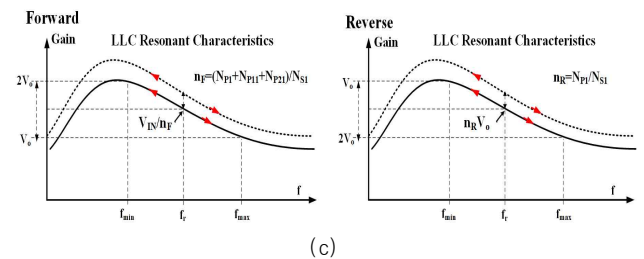
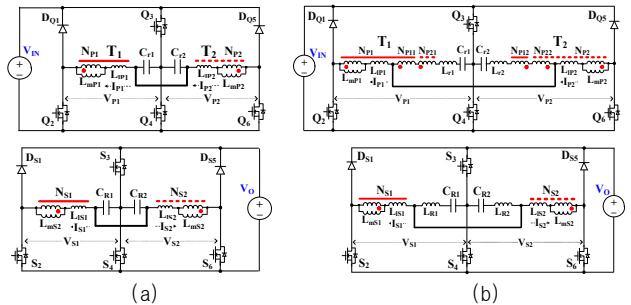


그림 2. (a)양방향 LLC 공진컨버터, (b)보조권선 적용 양방향 LLC 공진컨버터, (c)제한된 회로도 이득특성

그림 2(b)의 양방향 전력수수가 가능한 LLC 공진컨버터 주회로 구성은 1차측 입력단 및 2차측 출력단 양단에 각각 2개의 스위칭소자 및 다이오드(1차측: $D_{Q1}-Q_2$, Q_3-Q_4 , $D_{Q5}-Q_6$ 2차측: $D_{S1}-S_2$, S_3-S_4 , $D_{S5}-S_6$)가 직렬 연결된 브리지-암(Bridge-Leg)들이 각각 병렬연결 되어있다. 각 브리지-암 스위칭소자(1차측: $D_{Q1}-Q_2$, Q_3-Q_4 , $D_{Q5}-Q_6$ 2차측: $D_{S1}-S_2$, S_3-S_4 , $D_{S5}-S_6$)의 소스와 드레인 사이에 공진커패시터(1차측: C_{r1}/C_{r2} , 2차측: C_{R1}/C_{R2})와 각 변압기 1, 2차측 권선(1차측: $N_{P1}-N_{P11}-N_{P21}$, $N_{P2}-N_{P12}-N_{P22}$, 2차측: N_{S1} , N_{S2})이 각각 직렬 연결되어 있고, 공진커패시터(1차측: C_{r1}/C_{r2} , 2차측: C_{R1}/C_{R2}) 일단은 스위칭소자(1차측: Q_3-Q_4 , 2차측: S_3-S_4) 중앙단자 사이에 연결되고, 각 공진커패시터(1차측: C_{r1}/C_{r2} , 2차측: C_{R1}/C_{R2})와 각 변압기 1차측 보조권선과 2차측 권선(1차측: $N_{P11}-N_{P21}$, $N_{P12}-N_{P22}$, 2차측: N_{S1} , N_{S2})들이 직렬 연결된 타단은 공통으로 묶은 선에 연결되어 있다. 그리고 각 공진탱크회로 내의 변압기(T_1 , T_2) 1차측 권선은 서로 바라보는 극성(또는 반대로 바라보는 극성)을 갖고 구성되어 있으며, 각 변압기(T_1 , T_2) 2차측 권선 중 하나의

변압기 극성은 1차측 권선 변압기 극성과 다른 극성을 갖고 있다. 따라서 순방향 및 역방향 전력전달 동작시 1차측 및 2차측 변압기(T_1, T_2) 권선 전압극성 변화에 따라 공진커패시터(1차측: C_{r1}/C_{r2} , 2차측: C_{R1}/C_{R2})를 통해 공진전류가 흐르지 않고 공통연결선을 통해 우회하며 각각 정류 동작됨으로 고유의 LLC 공진특성을 가지고 양방향 전력전달 할 수 있다. 그림 2(c)에 나타낸 이득특성 곡선을 보면 순방향 전력전달 동작시 보조권선을 포함한 턴-수비[$n_F: ((N_{P1}+N_{P11}+N_{P21})/N_{S1}), ((N_{P2}+N_{P12}+N_{P22})/N_{S2})$]로 동작하며 역방향 전력전달 동작시에는 보조권선을 포함하지 않은 턴-수비[$n_R: (N_{S1}/N_{P1}, N_{S2}/N_{P2})$]로 동작하여 보다 낮은 이득특성을 갖고 동작하여 양방향 전력전달 동작시 승·강압 컨버터를 추가하지 않고 변압기의 보조권선을 적용하여 입·출력 이득을 용이하게 제어할 수 있다.

2.2 보조권선적용 양방향 LLC 공진컨버터 동작모드

2.2.1 순방향 전력전달 모드(Forward Power Transfer Mode)

순방향 전력전달 동작은 그림 3에 나타내었으며, 주스위칭 소자 Q_2 와 Q_4 는 계속 턴 온 되어 있는 상태에서 Q_5 와 Q_6 가 50% 듀티로 교번스위칭동작을 하고 각 1차측 공진회로에 입력 전압(V_{IN})의 1/2이 인가되며 각 변압기 1차측 주권선(N_{P1}, N_{P2}) 및 보조권선($N_{P11}/N_{P21}, N_{P12}/N_{P22}$)에 공진 전압이 인가된다. 또한 변압기(T_1, T_2) 1차측 주권선(N_{P1}, N_{P2}) 및 보조권선($N_{P11}, N_{P12}, N_{P21}, N_{P22}$)에 인가된 전압과 2차측에 유도된 권선(N_{S1}, N_{S2}) 전압극성에 따라 2차측에는 변압기 권선전압의 합 전압($V_{S1}+V_{S2}$)이 인가된다. 이때 2차측 주 스위칭소자 (S_2, S_4, S_5, S_6)는 턴-오프 되어있어 역병렬다이오드 및 다이오드(D_{S1}, D_{S3})를 통해 부하공진전류(I_{S1}, I_{S2})가 정류되며 2차측 공진커패시터(C_{R1}, C_{R2})를 통해 흐르지 않고, 공통연결선을 통해 부하공진전류(I_{S1}, I_{S2})가 우회하며 흘러 순방향 전력전달 동작시 LLC 공진컨버터 고유의 이득특성을 갖고 동작하여 순방향 전력전달 동작을 한다. 이때 1차측 공진탱크의 변압기 보조권선($N_{P11}, N_{P12}, N_{P21}, N_{P22}$)을 적용함으로써 턴-수비[$n_F: ((N_{P1}+N_{P11}+N_{P21})/N_{S1}), ((N_{P2}+N_{P12}+N_{P22})/N_{S2})$]에 따라 이득조정이 가능하다.

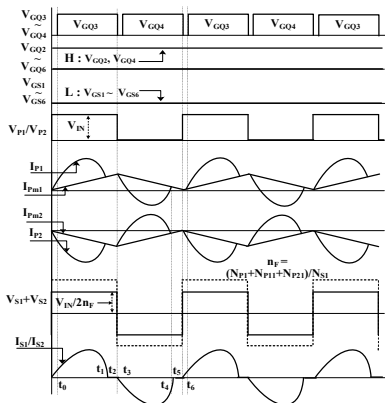


그림 3. 순방향 전력전달 모드(Forward Power Transfer Mode)

2.2.2 역방향 전력전달 모드(Reverse Power Transfer Mode)

역방향 전력전달 동작은 순방향 동작과 대칭으로 주스위칭 소자 S_2 와 S_4 는 계속 턴 온 되어 있는 상태에서 S_5 와 S_6 가 50% 듀티로 교번스위칭동작을 하고 각 2차측 공진회로에 출력 전압(V_O)의 1/2이 인가된다. 이때 인가된 2차측 변압기 권선(N_{S1}, N_{S2}) 전압에 의해 1차측 변압기 권선(N_{P1}, N_{P2}) 전압 극성에 따라 합전압($V_{P1}+V_{P2}$)이 인가되고, 공통연결선 내의 1차측 각

공진회로에 연결된 보조권선 전압의 합($V_{NP11}+V_{NP21}, V_{NP12}+V_{NP22}$)은 0이어서 각 1차측 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})를 통해 흐르지 않고, 공통연결선을 통해 우회하며 흐르면서 1차측 다이오드(D_{Q1}, D_{Q3}) 및 주스위칭소자(Q_2, Q_4, Q_5, Q_6)의 역병렬다이오드를 통해 입력단으로 정류되어 역방향 전력 전달한다. 이때 1차측 공진회로의 변압기(T_1, T_2)에 보조권선($N_{P11}/N_{P12}, N_{P21}/N_{P22}$)을 적용함으로써 턴-수비[$n_R: N_{S1}/N_{P1}, N_{S2}/N_{P2}$]를 적용하여 순방향 및 역방향 전력전달 동작시 변압기 턴-수비(n_F, n_R)로 이득을 용이하게 조절할 수 있다.

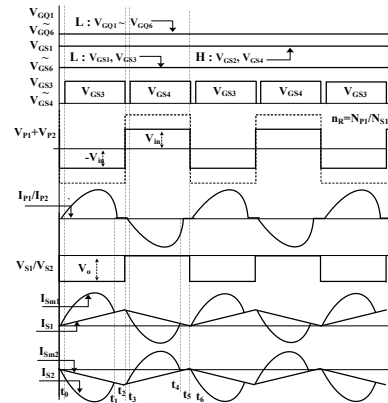
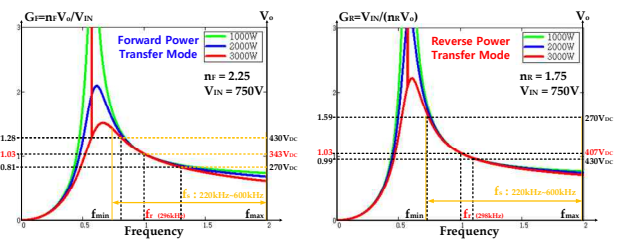


그림 4. 역방향 전력전달 모드(Reverse Power Transfer Mode)

3. 제안된 양방향 LLC 공진컨버터 전압이득특성

3.1 순방향 및 역방향 이득특성



(a) 순방향 및 역방향 입·출력 이득특성

그림 5. 보조권선 적용 양방향 LLC 공진컨버터 입·출력 이득특성

그림 5(c)는 Math-Cad를 사용한 입·출력 이득 특성 시뮬레이션 결과이다. 순방향 전력전달모드(Forward Power Transfer Mode), 역방향 전력전달모드(Reverse Power Transfer Mode)에서 1차측 공진탱크 변압기(T_1, T_2)에 보조권선($N_{P11}/N_{P12}, N_{S11}/N_{S12}$)을 적용함으로써 순방향 동작 시 변압기의 턴-수비[$n_F: ((N_{P1}+N_{P11}+N_{P21})/N_{S1}), ((N_{P2}+N_{P12}+N_{P22})/N_{S2})$]에 의해 출력단으로 전력전달 동작을 하며, 반대로 역방향 전력전달 동작시는 변압기의 턴-수비[$n_R: N_{S1}/N_{P1}$]로 이득을 낮게 전달 할 수 있다. 양방향 동작시 가변스위칭 주파수제어(220kHz~600kHz) 범위에서 양방향 전력전달이 가능하다.

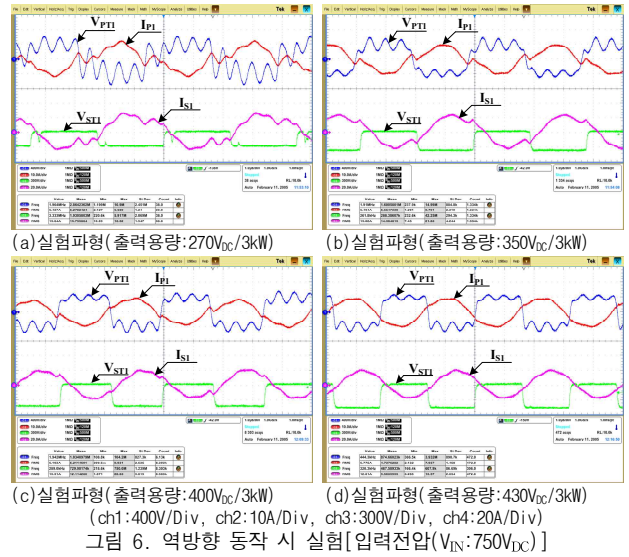
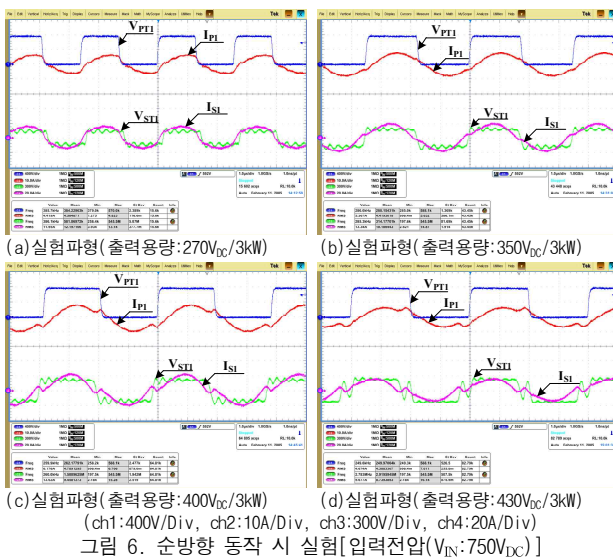
4. 실험 결과

본 논문에서는 양방향 동작 시 1차측 및 2차측 공진컨버터가 상호 커플링 되지 않고 동작하여 LLC공진컨버터 고유 이득 특성을 갖고 동작하며, 보조권선($N_{P11}/N_{P12}, N_{S11}/N_{S12}$)을 적용하여 입출력 이득제어에 용이한 양방향 공진컨버터를 제안하였고 입력전압(V_{IN}) 750V_{DC}를 입력받아 가변스위칭주파수 제어를 통해 출력전압 범위(270V_{DC}~430V_{DC})를 실험 구현하였다. 표. 1은 제안하는 양방향 LLC 공진컨버터의 주요정격과 사양, 변압기 파라미터를 나타내었다.

표. 1 보조권선 적용 양방향 LLC 공진컨버터 정격 및 파라미터

주요 정격	입력전압(V_{IN})	750V _{DC}	
	출력전압(V_O)	270V _{DC} ~ 430V _{DC}	
파라미터	1차측 공진커패시터(C_{R1}, C_{R2})	10.5nF	
	2차측 공진커패시터(C_{R1}, C_{R2})	56nF	
	1차측 공진인덕터(L_{R1}, L_{R2})	22.1uH	
	2차측 공진인덕터(L_{R1}, L_{R2})	4uH	
적용 소자	1차측 주스위칭소자(Q_2, Q_3, Q_4, Q_6)	UJ3C120040K3S (1200V, 65A, 35m Ω)	
	2차측 주스위칭소자(S_2, S_3, S_4, S_6)	UJ3C065030K3S (650V, 85A, 27m Ω)	
	1,2차측 다이오드($D_{Q1}, D_{Q6}, D_{S1}, D_{S5}$)	SCS240KE2 (1200V, 65A, 30m Ω)	
순방향	변압기 (T1/T2)	1차측 자기인덕턴스 ($L_{P1}+L_{P11}+L_{P21}$)/($L_{P2}+L_{P12}+L_{P22}$)	61.4uH/61uH
		2차측 자기인덕턴스(L_{S1})/(L_{S2})	11.73uH/11.65uH
		등가누설인덕턴스(L_{eq1})/(L_{eq2})	5.46uH/5.37uH
	권선비	$\frac{n_F}{(N_{P1}+N_{P11}+N_{P21}/N_{S1}) / (N_{P2}+N_{P12}+N_{P22}/N_{S2})}$	2.25 ((14+2+2)T:8T)
	공진주파수(f_r)	295.9kHz/296.3kHz	
역방향	Transformer (T1/T2)	1차측 자기인덕턴스(L_{P1})/(L_{P2})	35.06uH/35.28uH
		2차측 자기인덕턴스(L_{S1})/(L_{S2})	11.73uH/11.65uH
		등가누설인덕턴스(L_{eq3})/(L_{eq4})	1.086uH/0.904uH
	권선비	$\frac{n_R}{(N_{S1}/N_{P1}) / (N_{S2}/N_{P2})}$	0.571(8T:14T)
	공진주파수(f_r)	298.2kHz/303.7kHz	

그림 6은 입력전압(V_{IN}) 750V_{DC}를 인가받아 가변 스위칭주파수(220kHz ~ 600kHz)제어를 통해 출력전압 제어범위(270V_{DC} ~ 430V_{DC}), 용량 : 3kW 순방향 동작 실험 파형을 나타내었으며, 그림 7은 입력전압(V_{IN}) 750V_{DC}, 출력전압 제어범위(270V_{DC} ~ 430V_{DC}), 용량 : 3kW 역방향 동작 실험 파형을 나타내었다. 순방향 동작 시 출력전압 : 270V_{DC}/출력용량 : 2kW 조건에서 최대효율(98.59%)로 측정되었으며, 역방향 동작 시 출력전압 : 430V_{DC}/출력용량 : 3kW 조건에서 최대효율(96.53%)로 측정되었다.



본 논문은 2019년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업 임 연구과제(NRF-2018R1A2B6008925)입니다.

참고 문헌

- [1] Wei Chen, Ping Rong, and Zhengyu Lu, "Snubberless Bidirectional DC-DC Converter With New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss", IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 57, No. 9, September 2010, pp.3075-3086.
- [2] Yihan Gao, Hao Ma, "Analysis and Design of a Control Strategy for Wide-Range ZVS of Isolated Bidirectional Dual-bridge Series Resonant DC/DC Converters" 2019 10th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, pp3116-3121, 2019.05
- [3] F. Krismer, J. Biela, J. W. Kolar, "A Comparative Evaluation of Isolated Bi-directional DC/DC Converters with Wide Input and Output Voltage Range", IEEE IAS 2005, pp.599-606.
- [4] 김은수, "양방향 공진형 DC-DC 컨버터", 특허출원번호 10-2019-0011426, 2019. 01. 29