

보조권선 및 보조인덕터를 적용하여 이득특성을 제어하는

양방향 LLC 공진컨버터

장기찬, 유상재, 김민지, 김은수[†]

전주대학교

A Bidirectional LLC resonant converter controlling voltage gain characteristics by using auxiliary windings and auxiliary inductors

K.C Jang, S.J Yoo, M.G Kim, E.S Kim,[†]

JeonJu University

1. 서 론

전기자동차(EV: Electric Vehicle), 에너지저장시스템(ESS)과 같은 응용분야에 절연형 양방향 DC/DC 컨버터의 필요성이 증대되고 있다. 절연형 양방향 DC/DC 컨버터를 위해 CLLC 공진컨버터가 적용, 연구되고 있지만^[1], CLLC 공진컨버터에 1, 2차측 공진커패시터(C_r , C_R)가 적용되어 순방향 및 역방향 전력전달 동작시 1차측 및 2차측 공진커패시터가 서로 상호커플링 동작됨으로 공진주파수보다 낮은 주파수영역에서 이득이 낮아지는 부하의존성에 따라 이득제어의 한계가 있어 넓은 입출력전압제어가 어렵다.

본 논문에서는 양방향 DC/DC 공진컨버터에 1차측 및 2차측 공진커패시터가 적용된다 할지라도 상호커플링 없이 안정적으로 LLC 공진컨버터 고유이득특성을 갖고 동작할 수 있는 고효율 양방향 LLC 공진컨버터를 제안하고, 실험 검증하였다^[2].

2. 본 론

2.1 제안된 양방향 LLC 공진컨버터

제안된 양방향 LLC 공진컨버터를 그림 1에 나타냈으며, 1차측 및 2차측 주요 공진요소들을 볼 수 있다. 1차측 공진회로에서 변압기 T_1 과 T_2 의 주권선(N_{P1} , N_{P2}) 및 보조권선(N_{P11}/N_{P12} , N_{P21}/N_{P22})과 보조인덕터(L_{r1} , L_{r2}), 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})의 공진요소들이 1차측 스위치($Q_1 \sim Q_4$) 및 분압커패시터(C_1 , C_2)에 연결되어 있으며, 2차측 공진회로는 변압기 T_1 과 T_2 의 주권선(N_{S1} , N_{S2}) 및 보조인덕터(L_{R1} , L_{R2}), 공진커패시터(C_{R1} , C_{R2})가 2차측 스위치($S_1 \sim S_4$) 및 분압커패시터(C_3 , C_4)에 연결되어 있다. 또한, 1차측과 2차측에 공통연결선(Common Line) 적용에 따라 순방향 및 역방향 동작시에 공진커패시터(C_{r1}/C_{r2} , C_{R1}/C_{R2})를 우회하여 흐르도록 하여 상호커플링 되지 않고, 양방향 동작 모두 LLC 공진컨버터 이득특성을 가지고 동작된다.

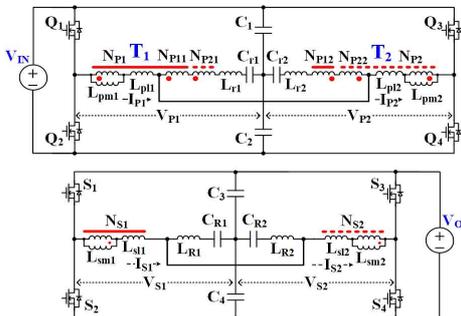


그림 1. 제안된 양방향 LLC 공진컨버터

다만, 순방향 및 역방향 전력전달 동작시 동작특성상 전압이득 차이가 존재하여 배터리 충·방전을 위해서는 어느 정도 이득

조절이 필요하다. 이를 위해서는 배터리 충·방전전압에 대응할 수 있도록 그림 1에 나타낸 것처럼 각 변압기(T_1 , T_2) 1차측 주권선(N_{P1} , N_{P2})에 보조권선(N_{P11}/N_{P12} , N_{P21}/N_{P22})을 적용함으로써 순방향 동작 시 턴-수비와 역방향 동작 시 턴-수비가 다르게 적용되어 전압이득을 조절하였다. 순방향 동작 시에는 보조권선이 공진에 포함되어 동작하므로 순방향턴수비 [$N_F = (N_{P1} + N_{P11} + N_{P21})/N_{S1}$, $(N_{P2} + N_{P22} + N_{P12})/N_{S2}$]가 적용되며, 역방향 동작 시에는 1차측 보조권선의 전압극성에 따라 반대방향으로 전압이 인가되고, 1차측 공통연결선(Common Line)을 통해 Bypass 되어 동작되기 때문에 역방향턴수비 [$N_R = N_{S1}/N_{P1}$, N_{S2}/N_{P2}]에 의해 전력 전달된다.

2.2 LLC 공진컨버터 순방향 및 역방향 동작

그림 2는 순방향 동작으로 1차측 스위치 Q_1/Q_3 와 Q_2/Q_4 가 동시에 턴-온/턴-오프되어 상호교번동작하며, 1차측 공진회로가 서로 병렬로 연결되어 동작한다. 이때, 분압커패시터(C_1 , C_2)에 의해 공진회로에 인가되는 전압은 입력전압의 절반($V_{IN}/2$)이며, 전류흐름상 공진에 보조권선이 포함되어 순방향턴수비(N_F)가 적용된다. 2차측은 변압기 극성에 따라 2차측 권선(N_{S1} , N_{S2})이 직렬로 연결되며, 공통연결선에 의해 부하전류(I_{S1} , I_{S2})가 우회되어 2차측 공진커패시터(C_{R1} , C_{R2})가 공진에서 제외되어 흐른다. 부하전류는 2차측 스위치(S_2/S_3 , S_1/S_4)의 역병렬 다이오드로 정류되어 합전압($V_{S1} + V_{S2}$)이 부하단(V_O)에 출력된다.

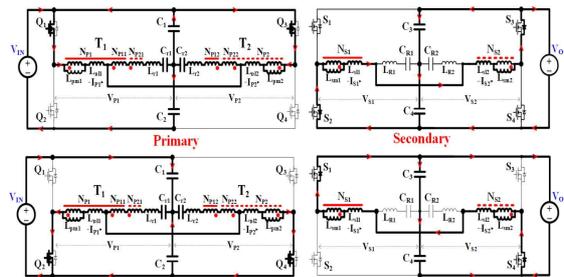


그림 2. 순방향 동작모드 전류흐름도

그림 3은 역방향 동작으로 2차측 스위치 S_1/S_3 와 S_2/S_4 가 동시에 턴-온/턴-오프되어 상호교번동작하며, 2차측 공진회로가 병렬로 연결되어 동작하고, 분압커패시터(C_3 , C_4)에 의해 출력전압의 절반($V_O/2$)이 2차측 공진회로에 인가된다. 이때, 1차측 주 권선(N_{P1} , N_{P2})은 직렬로 연결되어 동작하는데, 공진전류(I_{P1} , I_{P2})가 공통연결선으로 우회되어 1차측 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})가 공진에서 제외되며, 보조권선(N_{P11}/N_{P12} , N_{P21}/N_{P22}) 전압극성으로 인하여 서로 반대방향으로 전압이 인가되어 합 전압이 0이 된다. 이에 따라 역방향 동작 시 보조권선이 제외되어 역방향턴수비(N_R)에 의해 전력전달하며, 공진전류는 1차측 스위치(Q_2/Q_3 , Q_1/Q_4)의 역병렬 다이오드에 의해서 정류되어 합 전압($V_{P1} + V_{P2}$)이 1차측 입력단(V_{IN})에 출력된다.

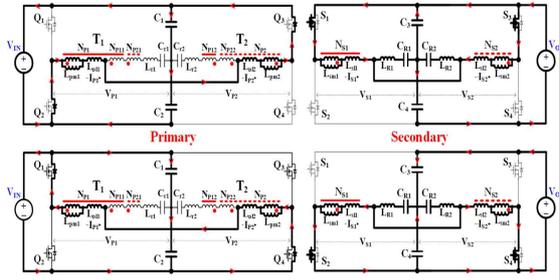


그림 3. 역방향 동작모드 전류흐름도

2.3 양방향 LLC 공진컨버터 이득특성

보조권선과 보조인덕터를 적용한 양방향 LLC 공진컨버터의 이득특성을 분석하기 위해서 순방향 및 역방향 동작 이득특성을 시뮬레이션 하였다. 이때, 순방향턴수비 [$N_F = 18/4 = 2.25$]와 역방향턴수비 [$N_R = 14/4 = 1.75$]를 적용하여 이득을 분석하였으며, 입력전압(V_{IN}) $750V_{DC}$ 에서 출력전압(V_O) $270V_{DC} \sim 430V_{DC}$ 제어범위를 동작주파수(f_r) $220kHz \sim 600kHz$ 범위에서 순방향 및 역방향 모두 동작구현 가능함을 보였다.

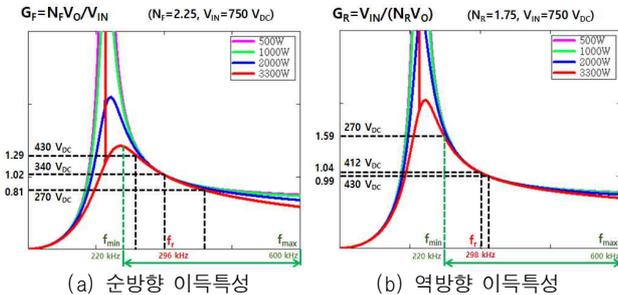


그림 4. 양방향 LLC 공진컨버터 이득특성 시뮬레이션

3. 실험 결과

본 논문에서는 보조권선 및 보조인덕터를 적용하여 이득특성을 제어하는 양방향 LLC 공진컨버터를 제안하였고, 이득특성제어를 검토하였다. 이때 적용된 각종 주요사양과 공진회로의 파라미터는 표 1과 2에 나타났다.

표 1 양방향 LLC 공진컨버터 입출력사양 및 적용 소자

주요 정격	입력전압(V_{IN})	$750 V_{DC}$
	출력전압(V_O)	$270 V_{DC} \sim 430 V_{DC}$
소자	1차측 스위칭 소자 ($Q_1 \sim Q_4$)	UJ3C120040K3S (1200 V, 65 A, 35 m Ω , SiC Mosfet)
	2차측 스위칭 소자 ($S_1 \sim S_4$)	UJ3C065030K3S (650 V, 85 A, 27 m Ω , SiC Diode)

표 2 공진회로 파라미터

파라 메터	1차측 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})	10.5 nF
	2차측 공진커패시터(C_{s1}, C_{s2})	56 nF
	1차측 보조인덕터(L_{r1}, L_{r2})	22.1 uH/22.1 uH
	2차측 보조인덕터(L_{r1}, L_{r2})	4 uH/4 uH
순방향 동작	1차측 자기인덕턴스(L_{p1}, L_{p2})	61.4 uH/61 uH
	2차측 자기인덕턴스(L_{s1}, L_{s2})	11.73 uH/11.65 uH
	등가누설인덕턴스(L_{eq1}, L_{eq2})	5.45 uH/5.37 uH
	순방향턴수비 (N_F)	2.25 [(14+2+2)/4]
역방향 동작	공진주파수 (f_r)	296 kHz
	1차측 자기인덕턴스(L_{p1}, L_{p2})	35.06 nH/35.28 nH
	2차측 자기인덕턴스(L_{s1}, L_{s2})	11.73 uH/11.65 uH
	등가누설인덕턴스(L_{eq3}, L_{eq4})	1.08 uH/0.9 uH
	역방향턴수비 (N_R)	1.75 [14/4]
	공진주파수 (f_r)	298 kHz

양방향 LLC 공진컨버터는 순방향 및 역방향 동작 모두 LLC 공진컨버터의 고유이득특성으로 동작하며, 동작주파수 제어를 통해 넓은 출력전압제어범위($270V_{DC} \sim 430V_{DC}$)로 동작하였다. 그림 5는 순방향 동작 시 실험파형으로 부하용량 3.3kW 조건에서 출력전압(V_O)을 $270V_{DC}$, $350V_{DC}$, $430V_{DC}$ 제어 시 실험파형이며, 최대효율은 출력전압 $350V_{DC}$ /출력용량 2kW에서 효율 98.81%를 보였다. 그림 6은 역방향 동작 시 실험파형으로 부하용량 3.3kW 조건에서 출력전압(V_O)을 $270V_{DC}$, $350V_{DC}$, $430V_{DC}$ 입력 시 실험파형이며, 이때 입력전압(V_{IN})을 $750V_{DC}$ 로 제어하였다. 이때, 최대효율은 출력전압 $350V_{DC}$ /부하용량 3kW에서 효율 97.70%를 확인할 수 있었다.

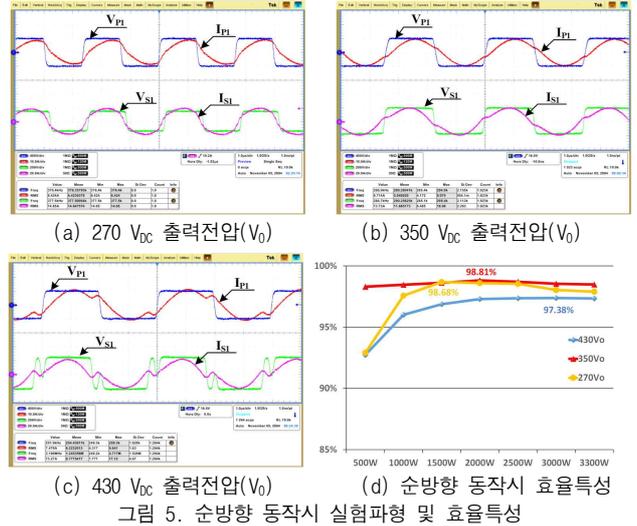


그림 5. 순방향 동작시 실험파형 및 효율특성

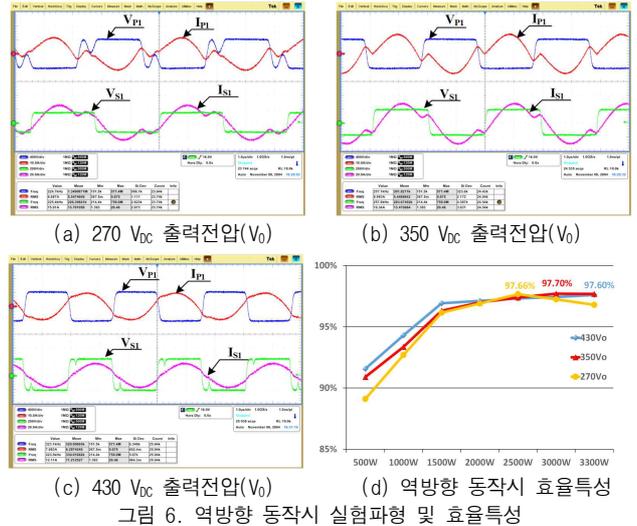


그림 6. 역방향 동작시 실험파형 및 효율특성

본 연구는 2020년 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업인 연구과제(NRF-2018R1A2B600892513)입니다.

참고 문헌

- [1] Wei Chen, Siran Wang, Xiaoyuan Hong, Zhengyu Lu, Shaoshi Ye, "Fully soft-switched bidirectional resonant dc-dc converter with a new CLLC tank," 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March. 2010.
- [2] 김은수, "양방향 공진형 DC-DC 컨버터", 특허출원번호 10-2019-0011426 (2019.01.29.)