

양방향 전력수수가 가능한 공진컨버터

이승민, 노영재, 전한석, 김은수*
 전주대학교

Resonant Converter for Bidirectional Power Conversion

S.M Lee, Y.J Noh, H.S Jeon, E.S Kim*
 JeonJu University

1. 서론

태양광발전 전력계통연계 PCS, 전기자동차 등에 절연형 양방향 DC/DC 컨버터가 에너지저장시스템의 변환장치로 적용이 확대되고 있다. 에너지저장시스템의 변환장치는 높은 효율과 안전성을 요구하므로 기존에는 절연형 고주파 변압기를 적용한 양방향 전력수수 가능한 DC/DC 컨버터에 있어서 전압원 컨버터 또는 전류원 컨버터가 접목된 양방향 전력수수 가능한 DC/DC 컨버터 등이 개발되어 왔다.^[1] 하지만 기본적으로 이들 전력변환장치들은 하드스위칭(Hard Switching)을 하기 때문에 스위칭손실에 의한 전력변환손실과 집적화를 위해 스위칭주파수를 높이는데 있어서 큰 단점을 가지고 있다.

최근 사이즈 및 스위칭손실, EMI저감을 위해 소프트스위칭 LLC 공진컨버터가 접목된 양방향 전력수수 가능한 DC/DC 컨버터가 적용되고 있다. LLC 공진컨버터는 영전압스위칭(ZVS: Zero Voltage Switching)과 영전류스위칭(ZCS: Zero Current Switching) 동작이 가능하며 규준화된 공진주파수점($f_s/f_r = f_n = 1$)을 기준으로 승·강압제어가 가능하므로 주어진 입력전압제어범위 및 부하범위에 대응하여 스위칭주파수 동작 제어를 통해 출력전압제어 및 전력제어를 할 수 있다. 하지만 그림 1과 같이 양방향 전력수수가 가능하기 위해 양방향 전력수수 가능한 LLC 공진컨버터 1차측 및 2차측에 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2} (또는 C_{B1}))를 적용하게 되는데, 순방향 및 역방향 전력전달 동작 시 적용된 1차측 및 2차측 공진커패시터 값에 따라 그림 2(a)와 같은 LLC 공진특성과 그림 2(b)와 같은 CCL 동작특성과 LLC 공진특성이 혼합된 CLLC 공진특성 및 그림 2(c)와 같이 SRC 공진특성이 나타나게 되어 공진주파수보다 낮은 영역 및 중부하시에는 이득 기울기가 공진주파수점에서의 이득보다도 적은 값을 갖는 기울기로 기울어져 기존 LLC 공진컨버터 이득 특성 때와는 달리 하드스위칭영역에서 동작하게 되어 영전압스위칭(ZVS : Zero Voltage Switching) 동작할 수 없게 된다.^[2]

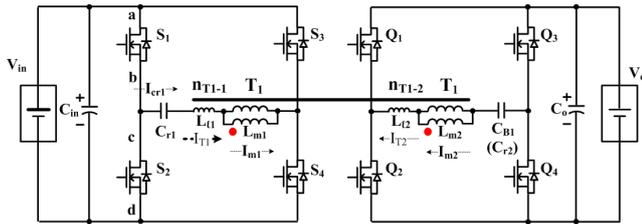
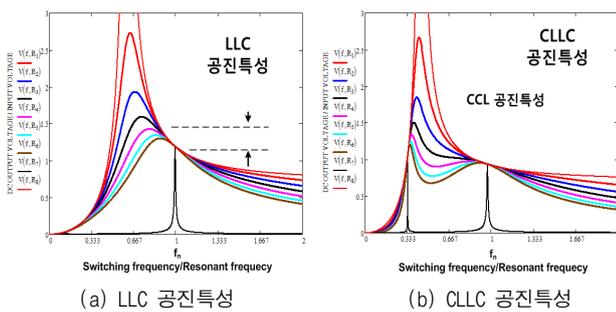
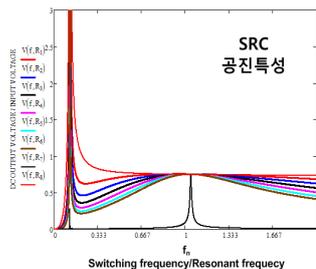


그림 1. 기존 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터 주회로도



(a) LLC 공진특성

(b) CLLC 공진특성



(c) SRC 공진특성

그림 2. 1, 2차측에 적용된 공진커패시터 값에 따른 이득 특성

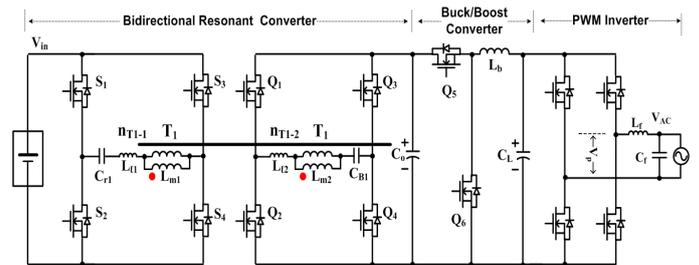


그림 3. 1, 2차측에 적용된 공진커패시터 값에 따른 이득 특성

그림 3에 나타낸바와 같이 최근 위에 서술된 동작특성을 이용하여 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터 1차측은 작은 값의 공진커패시터(C_{r1})를 적용하고 2차측에는 Blocking 커패시터(C_{B1})처럼 큰 값이 적용된 경우, 순방향 전력전달에 있어서 그림 2(a)와 같이 기존 LLC 공진컨버터 이득특성을 갖기 때문에 1차측 스위칭소자(S_1, S_4 , S_2, S_3)는 50% 고정된 듀티로 교번하여 가변 스위칭주파수제어를 통해 출력전압 및 전력제어를 하도록 구성하고, 2차측 스위칭소자는 턴-오프상태에 있기 때문에 스위칭소자의 역병렬다이오드(또는 Body 다이오드)가 정류 다이오드로 동작된다. 하지만, 역방향 전력전달에 있어서 2차측에 적용된 Blocking 커패시터(C_{B1})에 의해 2차측에서 1차측으로 바라보았을 때 그림 2(c)와 같이 기존 SRC 공진이득특성

처럼 일정이득특성을 갖기 때문에 2차측 스위칭소자(Q_1, Q_4, Q_2, Q_3)는 50% 고정된 듀티로 교번하여 일정주파수로 동작되도록 하고, 후단의 승·강압컨버터(Buck/Boost Converter)에서 승·강압컨버터 동작에 의해 승·강압되어 2차측에서 1차측으로 전력전달을 가능하도록 한 양방향 전력수수 가능한 DC/DC 컨버터가 적용되고 있다.^[1,3] 하지만 그림 3의 주 회로도에서 순방향 및 역방향 전력수수 시 양방향공진컨버터 뿐만 아니라 승·강압컨버터(Buck/Boost Converter)를 적용하기 때문에 전력변환손실 및 단가(Cost)가 증가하는 등 단점을 갖는다.

본 논문에서는 별도의 승·강압컨버터(Buck/Boost Converter)를 적용하지 않고 이득특성을 개선할 수 있는 DC/DC컨버터를 제한함으로써 변환손실을 최소화 할 수 있고 단가(Cost)를 저감 할 수 있는 560W 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터에 대해 적용 실험하였다.

2. 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터

본 논문에서는 별도의 승·강압컨버터(Buck/Boost Converter)를 적용하지 않고, 그림 4와 같이 양방향보조스위치($S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}, S_{A4}$)와 Blocking 커패시터($C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{B4}$)로 구성된 보조수단을 사용하여 양방향 전력수수가 가능한 공진컨버터의 순방향 및 역방향 전력전달 시 양방향보조스위치($S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}, S_{A4}$)를 턴-온, 턴-오프 제어하게 함으로 1차측 및 2차측 공진커패시터($C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4}$)와 1차측 및 2차측 Blocking 커패시터($C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{B4}$)가 차단 또는 병렬로 연결하여 줌으로써 순방향 및 역방향 전력전달 동작 시 그림 6과 같이 LLC 공진컨버터 이득특성을 갖도록 하여 줌으로써 높은 이득특성 및 영진압 스위칭(ZVS : Zero Voltage Switching)과 영전류스위칭(ZCS : Zero Current Switching) 동작이 가능하도록 하여 고효율특성을 갖는 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터를 제안하였다.^[4]

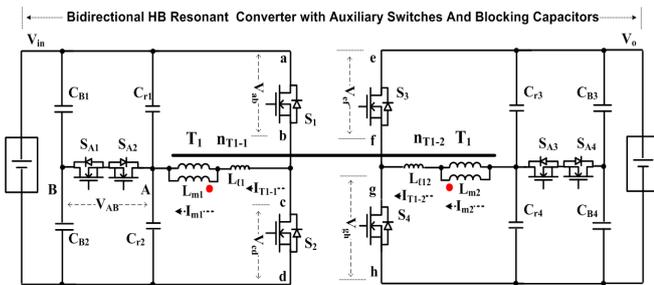
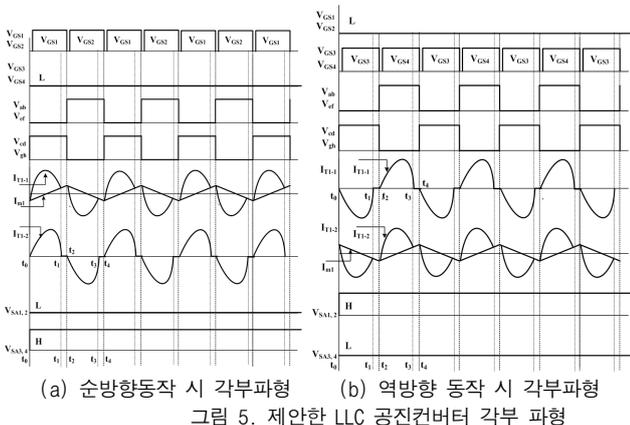


그림 4 보조스위치와 Blocking 커패시터 적용 양방향 전력수수 가능한 HB(Half Bridge) 공진컨버터



(a) 순방향동작 시 각부파형 (b) 역방향 동작 시 각부파형
그림 5. 제안된 LLC 공진컨버터 각부 파형

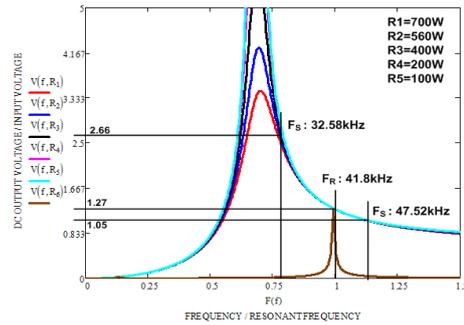


그림 6. 입력전압 155V_{dc}~400V_{dc}일 때의 보조스위치적용 제안된 양방향공진컨버터이득특성

2.1 순방향 동작

순방향 동작 시 그림 5(a)와 같이 1차측 스위칭소자(S_1, S_2)는 각각 고정된 듀티비(50%)를 가지고 턴-온, 턴-오프로 인가되고, 2차측 스위칭소자(S_3, S_4)는 턴-오프 상태로 유지되어 있고 2차측 스위칭소자(S_3, S_4)의 역병렬다이오드가 정류다이오드로 동작된다. 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진이득 특성을 갖기 위해 1차측 보조스위치(S_{A1}, S_{A2})는 턴-오프 되어 동작하지 않고 1차측 Blocking 커패시터(C_{B1}, C_{B2})는 1차측 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})와 병렬 연결되지 않는다. 1차측 Blocking 커패시터(C_{B1}, C_{B2})는 단지 입력전원처럼 동작된다. 따라서 1차측 보조스위치(S_{A1}, S_{A2})와 1차측 Blocking 커패시터(C_{B1}, C_{B2})로 구성된 1차측 보조수단은 동작되지 않고, 2차측 양방향보조스위치(S_{A3}, S_{A4})가 턴-온 동작되어 2차측 공진커패시터(C_{r3}, C_{r4})와 2차측 Blocking 커패시터(C_{B3}, C_{B4})가 병렬로 연결되어 큰 값의 커패시턴스($C_{r3}+C_{B3}, C_{r4}+C_{B4}$)를 가지므로 공진컨버터 입력측(1차측)에서 출력측(2차측)을 바라보았을 때 그림 6과 같이 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진컨버터처럼 동작을 하게 된다.

2.2 역방향 동작

역방향 동작시 그림 5(b)와 같이 2차측 스위칭소자(S_3, S_4)는 각각 고정된 듀티비(50%)를 가지고 턴-온, 턴-오프 인가되고, 1차측 스위칭소자(S_1, S_2)는 턴-오프 상태로 유지되고 스위칭소자의 역병렬다이오드가 정류다이오드로 동작된다. 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진이득특성을 갖기 위해 공진컨버터 2차측에 위치한 보조스위치(S_{A3}, S_{A4})는 턴-오프 되어 동작하지 않고, 2차측 Blocking 커패시터(C_{B3}, C_{B4})는 2차측 공진커패시터(C_{r3}, C_{r4})와 병렬 연결되지 않는다. 2차측 Blocking 커패시터(C_{B3}, C_{B4})는 단지 입력전원처럼 동작된다. 따라서 보조스위치(S_{A3}, S_{A4})와 2차측 Blocking 커패시터(C_{B3}, C_{B4})로 구성된 2차측 보조수단은 동작되지 않고, 1차측 보조스위치(S_{A1}, S_{A2})들이 턴-온 동작되어 1차측 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})와 1차측 Blocking 커패시터(C_{B1}, C_{B2})가 병렬로 연결되어 큰 값의 커패시턴스($C_{r1}+C_{B1}, C_{r2}+C_{B2}$)를 가지므로 공진컨버터 출력측(2차측)에서 입력측(1차측)을 바라보았을 때 그림 6과 같이 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진컨버터처럼 동작을 하게 된다.

3. 실험결과

본 논문에서는 560W 출력용량을 갖는 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터를 적용하여 입력전압 155~400V 조건에서 최대정격출력용량 400W/1.4A에 대해 각각 실험하였다. 그리고 적용된 실험조건과 주요정격에 대해 표 1에 나타내었다.

표 1. 제안된 컨버터 주요 정격 및 변압기 파라미터

입력 전압(V_{in})	155V _{dc} ~400V _{dc}
출력전압(V_o) 및 전류, 출력용량(P_o)	400V/1.4A, 560W
스위칭주파수(f_s), 공진주파수(f_r)	32.5kHz~47.6kHz, 41.8kHz
공진 커패시터(C_{r1} , C_{r2} , C_{r3} , C_{r4})	68nF
블러킹 커패시터(C_{B1} , C_{B2} , C_{B3} , C_{B4})	2 μ F
스위칭 소자(S_1 , S_2 , S_3 , S_4)	FGH40N6S2D(600V/35A)
보조스위치 소자(S_{A1} , S_{A2} , S_{A3} , S_{A4})	IHY30N160R2(1600V/30A)
적용된 제어 IC	MC34067
변압기 1, 2차측 자기인덕턴스(L_p , L_s)	228.6 μ H/203.8 μ H
변압기 1, 2차측 누설인덕턴스(L_{l1} , L_{l2})	73.26 μ H/48.46 μ H
등가누설인덕턴스(L_{eq}), 턴수비(N_1/N_2)	110.2 μ H, (34/34)

그림 7과 그림 8은 그림 4의 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터 실험파형으로, 그림 7은 입력전압(V_{in}) 155V_{dc}, 250V_{dc}, 출력전압(V_o) 400V_{dc}에 대하여 560W일 때, 단자전압(V_{cd} , 전류(I_{T1-1} , I_{T1-2})와 보조스위치 전압(V_{AB})를 측정한 파형이다. 그림 8은 입력전압(V_{in}) 300V_{dc}, 400V_{dc}, 출력전압(V_o) 400V_{dc}에 대하여 560W일 때, 단자전압(V_{cd} , 전류(I_{T1-1} , I_{T1-2})와 보조스위치 전압(V_{AB})를 측정한 파형이다.

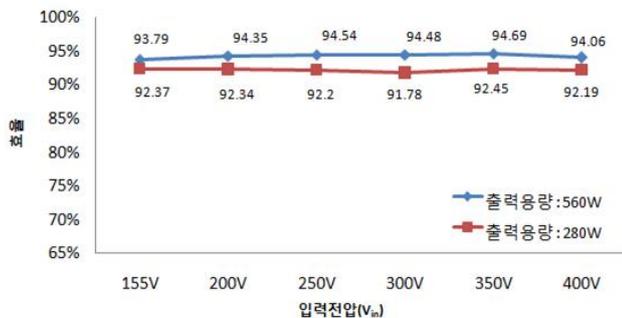
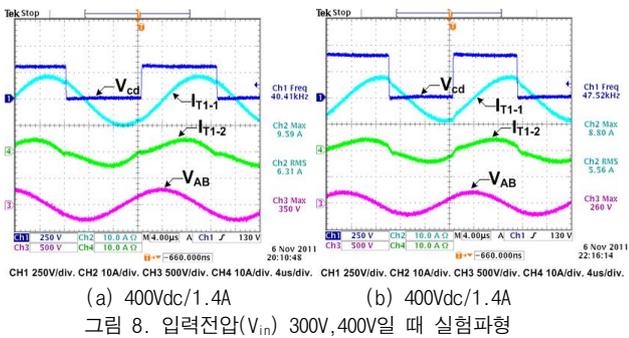
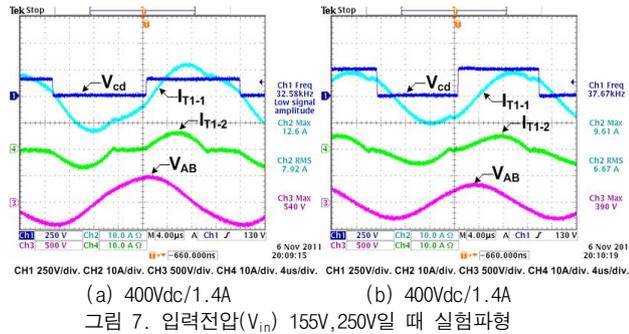


그림 9는 그림 4의 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터의 효율측정으로 입력전압 155V_{dc}에서는 최대부하(560W)일 때 93.79% 효율이 측정되었고, 입력전압 400V_{dc}에서는 최대부하(560W)일 때 94.06%의 효율 특성을 보여주었다.

4. 양방향 DC/DC 컨버터 다른 주회로 예

순방향 및 역방향으로의 양방향 전력전달 시 이득특성 조정 및 전력제어를 위해 아래 그림 10(a)처럼 순방향제어일 경우 1차측 정류스위치소자(S_{R1} , S_{R2})는 턴-오프 되어 있고, 1차측 양방향보조스위치(S_{A1} , S_{A2})는 턴-온 되어 있으며 1차측 스위치소자(S_1 , S_2)는 50% 듀티와 교번동작으로 가변 스위칭주파수 제어를 통해 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})와 변압기 1차측단과 반파공진으로 전력제어를 하고, 2차측 스위치소자(S_3 , S_4)는 턴-오프 되어 있고 역-병렬다이오드를 통해 Voltage Doubler처럼 정류동작 되어 전력을 전달한다. 이때 2차측 보조스위치(S_{A3} , S_{A4})는 턴-온 되어 2차측공진커패시터와 블러킹커패시터는 병렬연결되고 출력커패시터처럼 동작을 한다. 역방향 전력전달의 경우는 1차측 양방향보조스위치(S_{A1} , S_{A2})는 턴-오프되고, 1차측 정류스위치소자(S_{R1} , S_{R2})는 턴-온, 1차측 스위치소자(S_1 , S_2)는 턴-오프 되어 역-병렬다이오드와 함께 전파정류로 동작되고, 2차측 보조스위치(S_{A3} , S_{A4})는 턴-오프되어 2차측 블러킹커패시터와 공진커패시터는 분리되고 50% 듀티와 함께 교번으로 동작되는 2차측 스위치소자(S_3 , S_4)의 가변 스위칭주파수 제어를 통해 2차측 공진커패시터와 2차측 변압기단과 반파공진을 하며 2차측에서 1차측으로 전력 전달하여 동일 이득특성으로 전력변환 제어할 수 있도록 동작된다. 그림 10(b)에 대한 내용은 추후에 다루고자 한다.

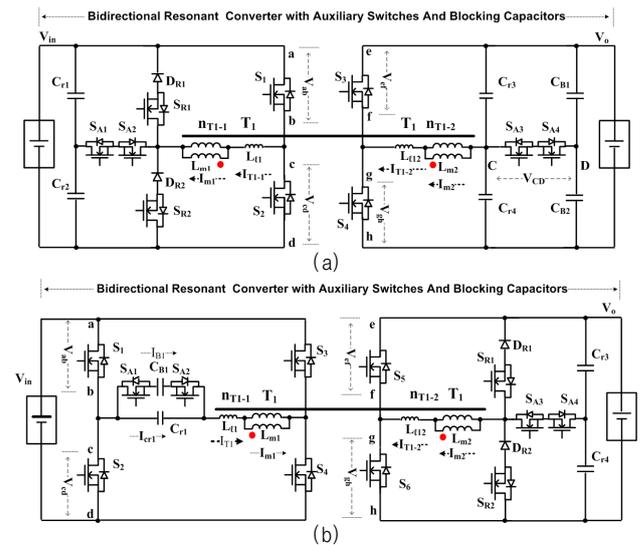


그림 10. 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터 다른 주회로들

이 논문은 한국연구재단(KRF-2008-313-D00369) 과제와 카코뉴에너지(주) 산학협력연구과제 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 채형준, 이윤재, 윤수영, 오은태, 유광민, 이준영 "Unregulated BUS converter를 사용한 3kW급 에너지 저장용 양방향 컨버터" 전력전자 학회논문집 2009.7, pp408~410
- [4] 김은수, "양방향 직류-직류 컨버터", 특허출원(10-2011-0111497).