

LLC 공진컨버터 적용 양방향 DC-DC 컨버터

이승민*, 박준형*, 김은수*†, 원종섭*, 김경환**, 공영수***
 전주대학교*, 카코뉴에너지(주)**, 국립과학수사연구원***

Resonant Converter for Bidirectional Power Conversion

S.M Lee*, J.H Park*, E.S Kim*†, J.S Won*, G.H Kim**, Y.S Kong***
 JeonJu University*, KACO new energy Inc.**, National Forensic Service***

1. 서론

최근 배터리 충·방전 시스템, 무정전 전원 공급시스템(UPS), 하이브리드 전기자동차(HEV), 태양광발전 계통연계시스템 등 여러 분야에 양방향 DC DC 컨버터가 주목되고 있다. 기존에는 절연형 고주파 변압기를 적용한 전압원 컨버터 또는 전류원 컨버터가 양방향 DC DC 컨버터에 적용 개발되어 왔다.^[1] 기본적으로 위와 같은 DC DC 컨버터들은 하드 스위칭(Hard Switching)을 하기 때문에 스위칭손실에 의한 전력변환손실과 집적화를 위해 스위칭주파수를 높이는데 있어서 한계가 있으므로 집적화 및 스위칭손실, EMI 저감을 위해 소프트 스위칭이 가능한 LLC 공진컨버터가 주목된 양방향 DC DC 컨버터가 개발이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 그림 1과 같이 기존 양방향 LLC 공진컨버터에서는 순방향 모드 및 역방향 모드 전력 전달 시 적용된 1, 2차측 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2} (또는 C_{B1})) 값에 따라 CCL 동작특성과 LLC 동작특성이 혼합된 CLLC 공진특성 및 SRC 공진특성을 가지게 되어 모든 입력전압범위 및 부하범위에 대해 제어가 매우 어렵기 때문에^[2] 그림 1과 같이 2단 구성 양방향 DC DC 컨버터가 많이 적용되고 있다.

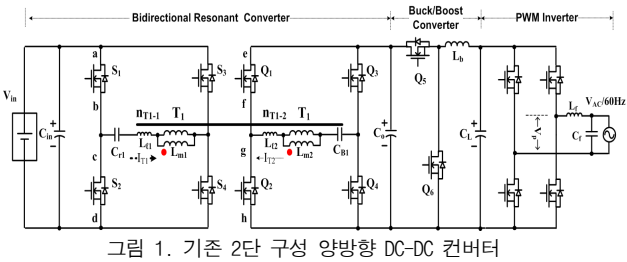


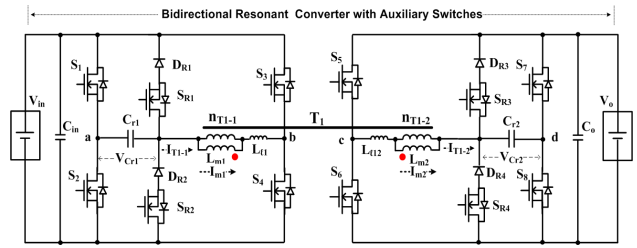
그림 1. 기존 2단 구성 양방향 DC-DC 컨버터

본 논문에서는 별도의 승·강압컨버터(Buck/Boost Converter)를 적용하지 않고 집적화 및 스위칭손실, EMI 저감이 가능한 LLC 공진컨버터만을 적용하여 이득특성을 개선할 수 있는 양방향 DC DC 컨버터를 제안함으로써 변환손실을 최소화 할 수 있고 단가를 저감 할 수 있는 2kW급 양방향 DC DC 컨버터에 대해 적용 실험내용이다.

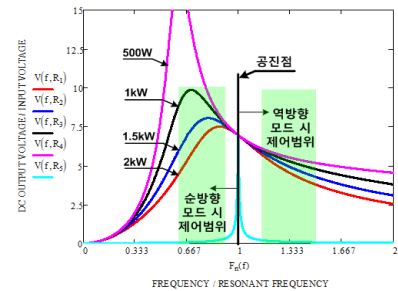
2. LLC 공진컨버터 적용 양방향 DC-DC컨버터

그림 1에서처럼 별도의 승·강압컨버터(Buck/Boost Converter)를 적용하지 않고 그림 2와 같이 LLC 공진특성만을 이용하여 양방향으로 전력전달을 하기 위해 풀 브리지 공진컨버터 주 스위칭소자와 더불어 보조스위칭과 다이오드로 구성된 보조수단을 갖는 양방향 전력수수 가능한 LLC 공진컨버터를 제안했다.^[3] 순방향 동작 모드 시 높은 입력전압범위(V_{in})에서 가장

높은 전압을 기준으로 공진주파수점 부근에서 스위칭하여 일정 출력전압(V_o)을 제어하도록 변압기설계 및 공진회로를 설계하게 되는데, 그림 3과 같이 입력전압(V_{in})이 낮아지게 되면 일정 출력전압(V_o)을 제어하기 위해 스위칭주파수를 낮은 주파수로 이동시켜 이득을 높여 불연속모드 공진특성을 가지고 동작된다. 하지만 반대로 역방향동작 모드 시에는 일정 출력전압(V_o)에서 높은 입력전압(V_{in})을 기준으로 공진점에서 동작하기 때문에 입력전압(V_{in})이 낮아지게 되면 그림 2(b)와 같이 연속모드에서 제어하게 된다. 하지만 연속모드에서 동작하게 되면 이득변화가 크지 않기 때문에 낮은 전압으로 전력제어가 어렵다.



(a) 기 제안된 LLC 공진컨버터 적용 양방향 DC-DC 컨버터 주회로



(b) 전압이득특성

그림 2. 기 제안된 양방향 DC-DC 컨버터 주회로 및 이득특성

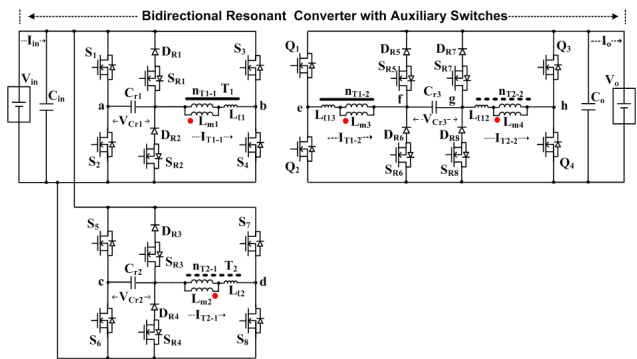


그림 3. 제안된 LLC 공진컨버터 적용 양방향 DC-DC 컨버터

따라서 본 논문에서는 양방향 전력제어 시 이득제어를 위해서는 그림 3과 같이 개별 변압기(T_1 , T_2)를 사용한 풀 브리지 공진컨버터 1차측 변압기는 극성을 달리하여 각각 병렬 연결되고, 각 변압기 2차측은 같은 극성으로 직렬연결 구성된 회로를 제안했다.^[4]

2.1 순방향 모드 시 동작 및 전압이득특성

순방향 동작 시 그림 4와 같이 풀 브리지 공진컨버터 1차측 스위칭소자(S_1, S_4, S_2, S_3)와 병렬로 연결된 다른 풀 브리지 공진컨버터 1차측 스위칭소자(S_5, S_8, S_6, S_7)는 각각 고정된 듀티비(50%)를 가지고 턴 온, 턴 오프 스위칭 되고 1차측 보조스위치($S_{R1}, S_{R2}, S_{R3}, S_{R4}$)는 항상 턴 오프 되어 있어 1차측 스위칭소자가 동작 시 1차측 공진에 영향을 주지 않는다. 순방향 동작 동안 2차측 스위칭소자(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)는 턴 오프 상태이기 때문에 2차측 스위칭소자의 역·병렬다이오드는 정류다이오드로 동작되며 이 때 2차측 보조스위치($S_{R5}, S_{R6}, S_{R7}, S_{R8}$)는 항상 턴 온 되어 동작되어 있으므로 2차측 공진전류는 2차측 공진커패시터(C_3)를 통해 흐르지 않고 2차측 스위칭소자(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)의 역·병렬다이오드와 함께 정류되어 동작한다. 따라서 순방향 전력전달 동작 시 높은 전압이득특성을 갖는 LLC 공진컨버터처럼 동작하게 된다.

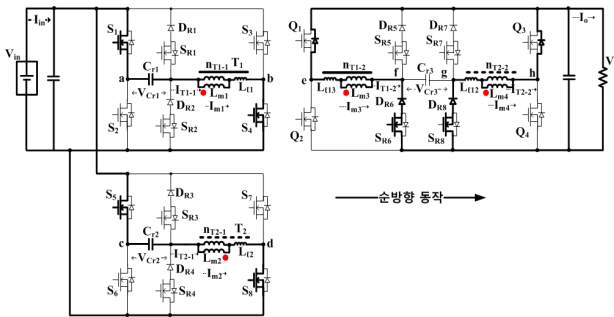
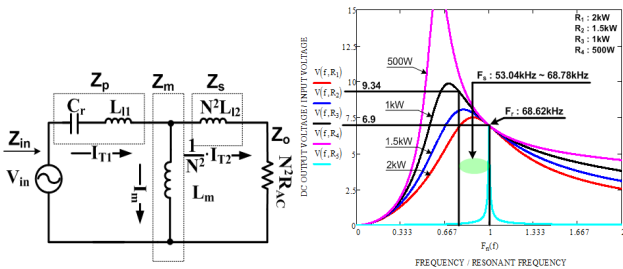


그림 4. 순방향 동작모드

제안된 양방향 공진 DC DC 컨버터의 순방향동작 모드 시 1차측은 병렬로 두 대의 변압기가 각각 개별 공진을 하게 되고, 2차측도 두 대의 변압기가 각각의 스위칭소자의 역·병렬다이오드와 2차측 보조스위치를 통해 정류하게 된다. 그러므로 두 대의 변압기의 파라미터가 동일하다고 가정하면 그림 5(a)와 같이 한 대의 변압기만을 가지고 1/2 부하 용량(1kW)의 전압이득 특성을 분석한 등가회로로 볼 수 있다. 그림 5(a)는 그림 2에 대한 파라미터 값을 1차측으로 반영한 등가회로를 나타낸 것으로, C_r 는 공진커패시터, L_{11} , $N^2 L_{12}$ 는 1차측, 2차측 누설인덕턴스, L_m 은 자화인덕턴스, R_{AC} 는 정류다이오드와 필터 커패시터를 등가화한($R_{AC}=8R_v/\pi^2$)것이다. 그러므로 입력 임피던스(Z_{in}) 대 출력 임피던스(Z_o)로 얻은 최종 전압 이득특성 식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 표 2의 파라미터 값을 가지고 식 (1)을 Math CAD에 적용하여 얻은 시뮬레이션 결과는 그림 5(b)에 나타내었다.



(a) 등가회로 (b) 전압이득특성
그림 5. 순방향 모드 시 등가회로도 및 이득특성

$$G = \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + \frac{L_{11}}{L_m} - \left(\frac{f_r}{f_s}\right)^2} \times \left(\frac{L_{11}}{L_m} + \frac{N^2 L_{12}}{L_m} \right) + \frac{2\pi f_r L_{12}}{R_{AC}} \frac{1}{N^2} \left(1 + \frac{N^2 L_{12}}{L_m} \right) \left(\frac{f_s}{f_r} - \frac{f_r}{f_s} \right) \right| \quad (1)$$

2.2 역방향 모드 시 동작 및 전압이득특성

역방향 동작 시 그림 6과 같이 2차측 풀 브리지 공진컨버터 스위칭소자(Q_1, Q_4, Q_2, Q_3)는 각각 고정된 듀티비(50%)를 가지고 턴 온, 턴 오프 스위칭 되고, 2차측 보조스위치($S_{R5}, S_{R6}, S_{R7}, S_{R8}$)는 항상 턴 오프 되어 있어 2차측 스위칭소자가 동작 시 2차측 공진에 영향을 주지 않는다. 역방향 동작 동안 2차측 두 대의 변압기 T_1 과 T_2 는 같은 극성으로 직렬 연결되어 있어 각각 변압기에는 일정 출력전압(V_o)의 1/2 전압만이 인가되어 1차측 입력전압(V_{in})을 제어하기 때문에 역방향 동작 시에도 원하는 전압이득 제어가 가능하게 된다. 그리고 역방향 동작동안 1차측 스위칭소자($S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$)는 턴 오프 상태이기 때문에 역·병렬다이오드는 정류다이오드로 동작되며, 이 때 1차측 보조스위치($S_{R1}, S_{R2}, S_{R3}, S_{R4}$)는 항상 턴 온 되어 동작됨으로 공진전류는 1차측 공진커패시터(C_1, C_2)를 통해 흐르지 않고 1차측 스위칭소자($S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$)의 역·병렬다이오드와 함께 정류되어 동작한다. 따라서 역방향 동작 시에도 높은 전압이득특성을 갖는 LLC 공진컨버터처럼 동작하게 된다.

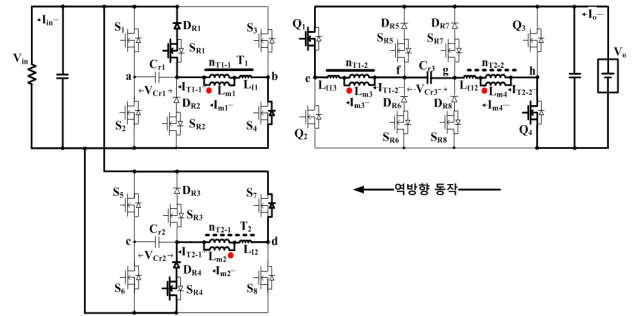
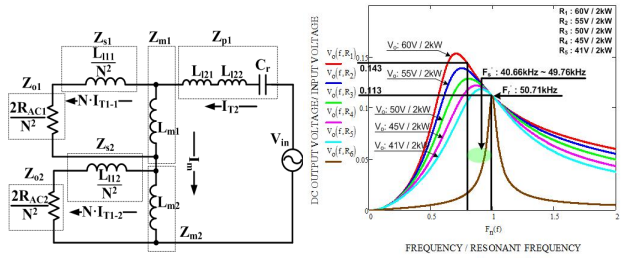


그림 6. 역방향 동작모드



(a) 등가회로 (b) 전압이득특성
그림 7. 역방향 모드 시 등가회로도 및 이득특성

제안된 양방향 공진 DC DC 컨버터의 역방향동작 모드 시 2차측 두 대의 변압기는 같은 극성으로 직렬 연결되어 2차측 공진커패시터(C_3)와 함께 공진을 하게 되고, 변압기 1차측은 다른 극성전압이 인가되지만 각각의 풀 브리지 공진컨버터 스위칭소자의 역·병렬다이오드와 1차측 보조스위치를 통해 정류하게 된다. 그러므로 그림 7(a)와 같이 1차측은 병렬, 2차측은 직렬인 등가회로로 볼 수 있다. 그림 7(a)는 그림 2에 대한 파라미터 값을 2차측으로 반영한 등가회로를 나타낸 것으로, L_{11}/N^2 , L_{12}/N^2 및 L_{21} , L_{22} 그리고 L_{m1} , L_{m2} 은 두 대 변압기의 1차측 누설인덕턴스 및 2차측 누설인덕턴스 그리고 자화인덕턴스를 나타낸 것이다. 또한 $2R_{AC1}/N^2$ 과 $2R_{AC2}/N^2$ 은 그림 2의 부하저항, 정류 다이오드 그리고 필터 커패시터를 등가화하여 2

차측으로 유도된 1/2 부하 용량에 대한 등가 부하저항이다. 그러므로 입력전압 대 두 개의 자화인덕턴스 L_{m1} , L_{m2} 에 인가되는 전압 이득특성 식은 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다. 표 2의 파라미터 값을 가지고 식 (3)과 식 (4)를 Math CAD에 적용하여 얻은 시뮬레이션 결과는 그림 7(b)에 나타내었다.

$$A_1 = \frac{\left(\frac{1}{N^2}\right)L_{l11}}{L_{m1}}, B_1 = \frac{L_{l21}}{L_{m1}}, C_1 = \frac{\left(\frac{1}{N^2}\right)2R_{AC}}{j\omega L_{m1}}, A_2 = \frac{\left(\frac{1}{N^2}\right)L_{l12}}{L_{m2}}, B_2 = \frac{L_{l22}}{L_{m2}}, C_2 = \frac{\left(\frac{1}{N^2}\right)2R_{AC}}{j\omega L_{m2}} \quad (2)$$

$$G_{VLm1} = \left| \frac{\frac{1}{N^2}(2R_{AC} + j\omega L_{l11})}{\left[\frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_{m1}\left(B_1 + \frac{A_1 + C_1}{1 + A_1 + C_1}\right) + j\omega L_{m2}\left(B_2 + \frac{A_2 + C_2}{1 + A_2 + C_2}\right)\right]} \times (A_1 + C_1 + 1) \right| \quad (3)$$

$$G_{VLm2} = \left| \frac{\frac{1}{N^2}(2R_{AC} + j\omega L_{l12})}{\left[\frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_{m2}\left(B_2 + \frac{A_2 + C_2}{1 + A_2 + C_2}\right) + j\omega L_{m1}\left(B_1 + \frac{A_1 + C_1}{1 + A_1 + C_1}\right)\right]} \times (A_2 + C_2 + 1) \right| \quad (4)$$

3. 실험결과

본 논문에서는 2kW 정격출력용량을 갖는 양방향 LLC 공진 DC DC 컨버터를 적용하여 순방향 모드 시 1차측 입력전압 (V_{in} : 41V~60V) 조건에서 2차측 일정 출력전압(V_o : 400V) 및 최대정격용량 2kW에 대해 실험하였다. 그리고 역방향 모드 시 2차측 일정 출력전압(V_o : 400V) 조건에서 1차측 제어전압 범위(41V~60V) 및 최대정격용량 2kW에 대해 실험하였다. 실험조건과 주요정격, 파라미터에 대해 표 1과 표 2에 나타냈다.

표 1. 제안된 양방향 공진 DC-DC 컨버터 주요정격

| 모드 | 입력전압 범위(V_{in}) | 41V~60V |
|----------|--------------------------|-----------------------------|
| 순방향 모드 시 | 출력전압 및 용량(P_o) | 400V / 5A (2kW) |
| | 스위칭주파수(f_s) | 53.04kHz~68.78kHz |
| | 공진주파수(f_r) | 68.6kHz |
| 역방향 모드 시 | 출력전압(V_o) | 400V |
| | 입력전압 범위 및 용량(P_{in}) | 41V~60V / 33.3A~48.8A (2kW) |
| | 스위칭주파수(f_s') | 40.66kHz~49.76kHz |
| | 공진주파수(f_r') | 50.71kHz |

표 2. 제안된 양방향 공진 DC-DC 컨버터 파라미터

| 순방향(1차측에서 바라본)/역방향(2차측에서 바라본) 변압기 파라미터 | |
|---|--------------------|
| 1차측자기인덕턴스(L_p) | 13.51uH |
| 등가누설인덕턴스(L_{eq}) / (L_{eq}') | 4.803uH / 148.6uH |
| 2차측자기인덕턴스(L_s) | 422.5uH |
| 1차측누설인덕턴스(L_{l1}) / (L_{l1}/N^2) | 2.482uH / 74.11uH |
| 2차측누설인덕턴스(N^2L_{l2}) / (L_{l2}) | 2.939uH / 87.93uH |
| 자화인덕턴스(L_m) / (L_m/N^2) | 11.03uH / 334.6uH |
| 턴수비 $N(N_1/N_2)$ | 0.182 (6 : 33) |
| 공진주파수(f_r) / (f_r') | 68.6kHz / 50.53kHz |
| 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2}) / (C_{r3}) | 1.12uF / 33nF |

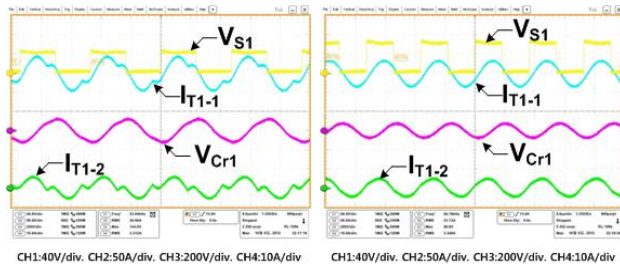


그림 8 입력전압(V_{in}) 41V, 60V일 때 2차측 부하 용량(2kW) 제어 시 단자전압(V_{s1}), 전류파형(I_{T1-1} , I_{T1-2}), 공진커패시터 전압(V_{Cr1})

그림 8은 그림 3의 실험파형으로, 순방향 모드 일 때 1차측 입력 제어전압(V_{in}) 41V, 60V 일 때 2차측 일정 출력전압(V_o) 400V에 대하여 2kW일 때, 단자전압(V_{s1}), 전류(I_{T1-1} , I_{T1-2})와 공진 커패시터 전압(V_{Cr1})을 측정된 파형이다.

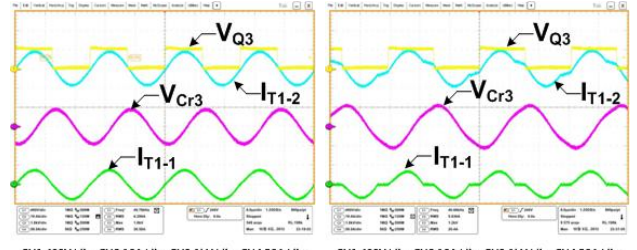
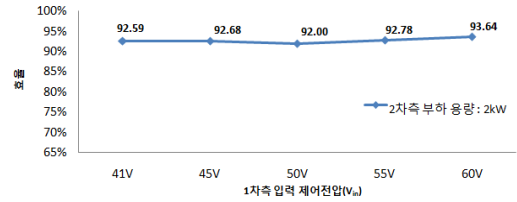
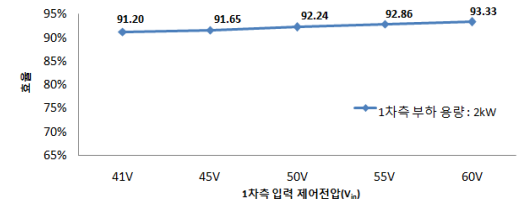


그림 9 입력전압(V_{in}) 41V, 60V일 때 1차측 부하 용량(2kW) 제어 시 단자전압(V_{Q3}), 전류파형(I_{T1-2} , I_{T1-1}), 공진커패시터 전압(V_{Cr3})

그림 9는 그림 3의 실험파형으로, 역방향 모드 일 때 2차측 일정 출력전압(V_o) 400V일 때 1차측 입력 제어전압(V_{in}) 41V, 60V에 대하여 2kW일 때, 단자전압(V_{Q3}), 전류(I_{T1-2} , I_{T1-1})와 공진커패시터 전압(V_{Cr3})을 측정된 파형이다.



(a) 순방향 모드



(a) 역방향 모드

그림 10 순방향, 역방향 모드 일 때의 2kW 부하 용량 효율

그림 10은 그림 3의 효율측정으로 순방향 모드 시 1차측 입력 제어전압(V_{in}) 60V, 2차측 일정 출력전압 및 부하 용량 400V/2kW 일 때 최대 93.64%의 효율 특성을 보여주었고, 역방향 모드 시 2차측 일정 출력전압(V_o) 400V, 1차측 입력 제어 전압 및 부하 용량 60V / 2kW 일 때 최대 93.33%의 효율 특성을 보여주었다.

이 논문은 카코뉴에너지(주)와 전주대 산학협력연구과제지원으로 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] 김은수 "양방향 직류 직류 컨버터", 특허출원(10 2012 0043433).
- [4] 김은수, 김경환 "양방향 전력변환 직류 직류 컨버터", 특허출원 준비 중, 2012.11.