

고효율 특성을 갖는 양방향 공진컨버터

박준형¹, 이승민¹, 김은수[†], 황인갑¹, 공영수²

High Efficiency Resonant Converter for Bidirectional Power Transfer

Jun-Hyoung Park¹, Seung-Min Lee¹, Eun-Soo Kim[†], In-Gab Hwang¹, and Young Su Kong²

Abstract - In this paper, For achieving the high gain and resonant characteristics in both of the power flow directions, a bidirectional resonant dc-dc converter with auxiliary switches is proposed. Auxiliary switches are connected in the primary and secondary side of the bidirectional resonant dc-dc converter, respectively. A 800W prototype bidirectional resonant dc-dc converter for interfacing the 400V DC buses in the energy storage system is built and tested to verify the validity and applicability of this proposed converter.

Keywords: bidirectional dc-dc converter, LLC resonant converter, high efficiency

1. 서 론

최근 태양광발전 전력계통연계시스템(PCS: Power Conditioning System), 축전지 충·방전시스템, 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.^[1,2] 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, EMI 저감을 위해 소프트스위칭 LLC 공진컨버터가 접목된 양방향 전력수수 가능한 DC/DC 컨버터가 적용되고 있다.^[3,4] LLC 공진컨버터는 영전압 스위칭(ZVS: Zero Voltage Switching)과 영전류 스위칭(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 가변 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(Series Resonant Converter) 공진특성이 나타나게 되어 공진주파수보다 낮은 영역 및 중부하시에는 이득 기울기가 공진주파수 점에서의 이득보다도 낮아지는 값을 갖는 기울기로 기울어져 기존 LLC 공진컨버터 이득특성 때와는 달리 하드스위칭영역에서 동작하게 되어 영전압스위칭(ZVS) 동작을 할 수 없게 된다.^[5]

그림 3에 나타낸 바와 같이 최근 위에 서술된 동작특성을 이용하여 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터 1차측은 작은 값의 공진커패시터(C_{r1})를 적용하고 2차측에

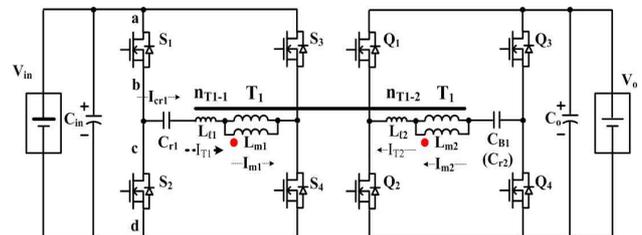


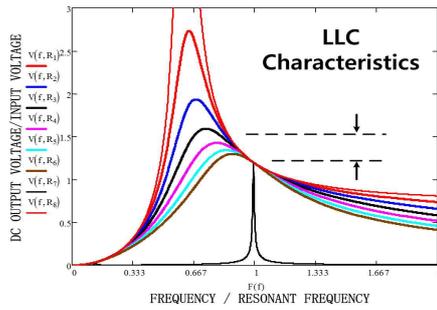
Fig. 1 Conventional resonant converter for bidirectional power transfer

Paper number: TKPE-2013-18-5-3 ISSN: 1229-2214
[†] Corresponding author: eskim@jj.ac.kr, Electrical & Electronics Engineering, Jeonju University
 Tel: +82-63-220-2906 Fax: +82-63-220-2056
¹ Electrical & Electronics Engineering, Jeonju University
² National Forensic Service
 Manuscript received Oct. 22, 2012; accepted May 27, 2013
 — 본 논문은 2012년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

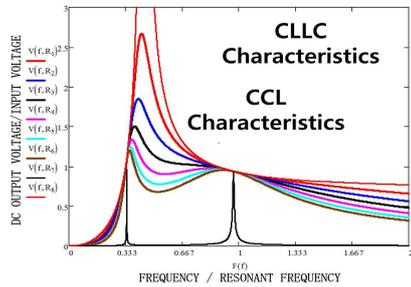
는 블록킹 커패시터(C_{B1})처럼 큰 값이 적용된 경우, 순방향 전력전달에 있어서 그림 2(a)와 같이 기존 LLC 공진컨버터 이득특성을 갖기 때문에 1차측 스위칭소자(S_1, S_4, S_2, S_3)는 50% 고정된 듀티로 교번하여 가변 스위칭주파수 제어를 통해 출력전압 및 전력을 제어하도록 구성하고, 2차측 스위칭소자는 턴-오프상태에 있기 때문에 스위칭소자의 역. 병렬다이오드(또는 Body 다이오드)가 정류다이오드로 동작된다. 하지만, 역방향 전력

전달에 있어서 2차측에 적용된 블록킹 커패시터(C_{B1})에 의해 2차측에서 1차측으로 바라보았을 때 그림 2(c)와 같이 기존 SRC 공진이득특성처럼 일정이득특성을 갖기 때문에 2차측 스위칭소자(Q_1, Q_4, Q_2, Q_3)는 50% 고정된 듀티로 교번하여 일정주파수로 스위칭되도록 하고, 후단의 승.강압컨버터(Buck/Boost Converter) 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.

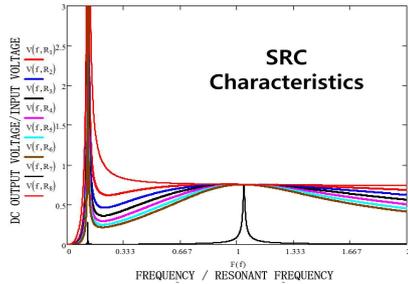
본 논문에서는 별도의 승.강압컨버터(Buck/Boost Converter)를 적용하지 않고 이득특성을 개선할 수 있는 새로운 DC/DC컨버터를 제안함으로써 전력변환손실을 최소화 할 수 있고 단가를 저감 할 수 있는 800W 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터에 대해 적용 실험하였다.



(a) LLC gain characteristics



(b) CLLC gain characteristics



(c) SRC gain characteristics

Fig. 2 Gain characteristics due to the value of resonant capacitors

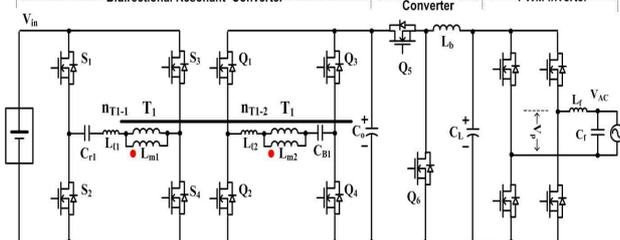


Fig. 3 Configuration of conventional bidirectional converter

2. 제안된 양방향 전력수수 가능한 LLC 공진컨버터

2.1 주회로 구성

별도의 승.강압컨버터(Buck/Boost Converter)를 적용하지 않고, 그림 4와 같이 제안된 양방향 전력수수 가능한 LLC공진컨버터는 양방향보조스위치($S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}, S_{A4}$, 또는 S_{Ap1}, S_{Ap2})와 블록킹 커패시터 또는 입력전해콘덴서($C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{B4}$)로 구성된 보조수단을 포함하고 있다. 제안된 양방향 전력수수가 가능한 LLC 공진컨버터의 순방향 및 역방향 전력전달 시 양방향보조스위치($S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}, S_{A4}$ 또는 S_{Ap1}, S_{Ap2})를 턴-온, 턴-오프 제어하게 함으로 1차측 및 2차측 공진커패시터($C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4}$)와 1차측 및 2차측 블록킹 커패시터($C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{B4}$)를 차단 또는 병렬로 연결하여 줌으로써 순방향

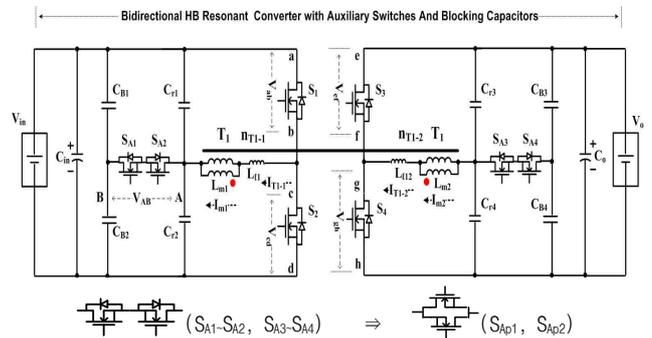


Fig. 4 Half Bridge LLC resonant converter using auxiliary switches and blocking capacitors for bidirectional power transfer

및 역방향 전력전달 동작 시 그림 2(a)와 같이 LLC 공진컨버터 이득특성을 갖도록 하여 줌으로써 높은 이득 특성 및 영전압스위칭(ZVS)과 영전류스위칭(ZCS) 동작이 가능하도록 하여 고효율특성을 갖는 양방향 전력수송 가능한 공진컨버터를 제안하였다.^[4]

2.2 순방향 동작모드

순방향 동작 시 그림 5와 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 역·병렬다이오드가 정류다이오드로 동작된다. 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진이득 특성을 갖기 위해 1차측 보조스위치(S_{A1}, S_{A2})는 턴-오프 되어 동작하지 않고 1차측 블록킹 커패시터(C_{B1}, C_{B2})는 1차측 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})와 병렬 연결되지 않는다. 1차측 블록킹 커패시터(C_{B1}, C_{B2})는 단지 입력전원처럼 동작된다. 따라서 1차측 보조스위치(S_{A1}, S_{A2})와 1차측 블록킹 커패시터(C_{B1}, C_{B2})로 구성된 1차측 보조수단은 동작되지 않고, 2차측 양방향 보조스위치(S_{A3}, S_{A4})가 턴-온 동작되어 2차측 공진커패시터(C_{r3}, C_{r4})와 2차측 블록킹 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 2(a)와 같이 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진컨버터처럼 동작을 하게 된다.

2.3 역방향 동작모드

역방향 동작시 그림 7과 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 역·병렬다이오드가 정류다이오드로 동작된다. 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진이득

특성을 갖기 위해 공진컨버터 2차측에 위치한 보조스위치(S_{A3}, S_{A4})는 턴-오프 되어 동작하지 않고, 2차측 블록킹 커패시터(C_{B3}, C_{B4})는 2차측 공진커패시터(C_{r3}, C_{r4})와 병렬 연결되지 않는다. 2차측 블록킹 커패시터(C_{B3}, C_{B4})는 단지 입력전원처럼 동작된다. 따라서 보조스위치(S_{A3}, S_{A4})와 2차측 블록킹 커패시터(C_{B3}, C_{B4})로 구성된

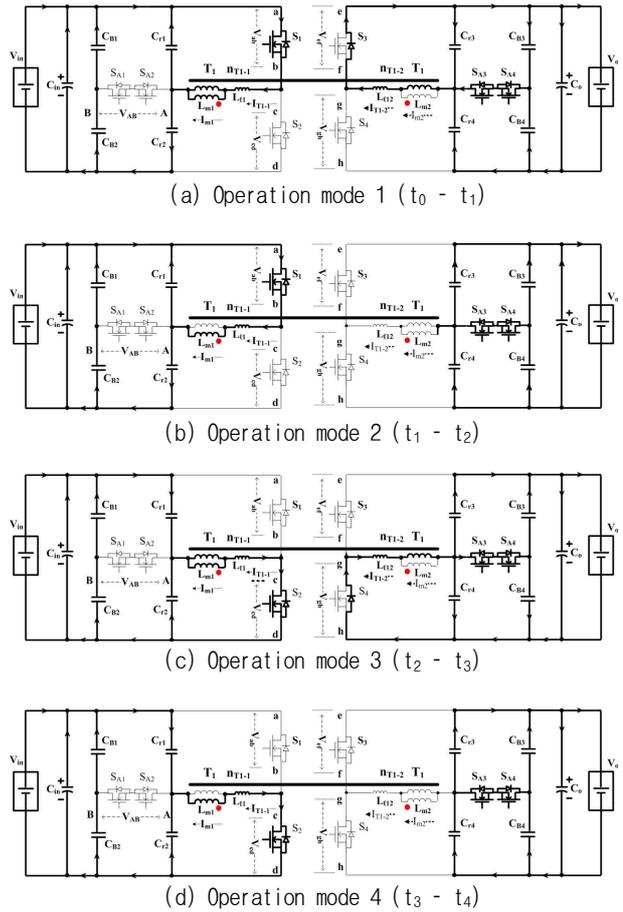


Fig. 6 Forward operation mode

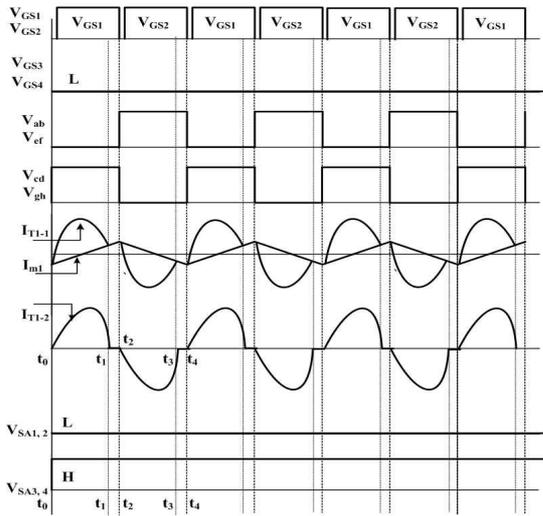


Fig. 5 Waveforms of forward operation mode

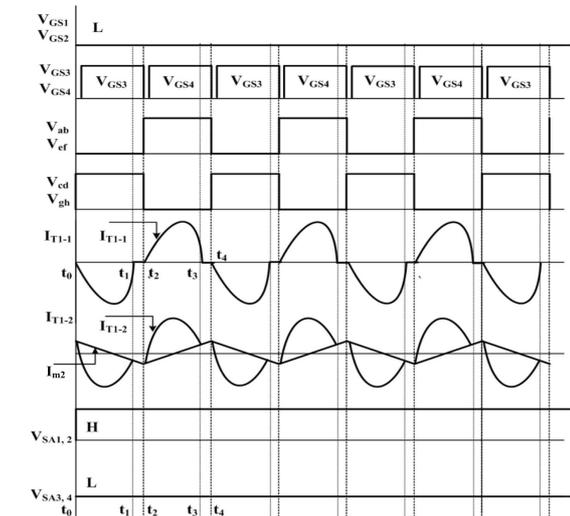


Fig. 7 Waveforms of reverse operation mode

2차측 보조수단은 동작되지 않고, 1차측 보조스위치(S_{A1} , S_{A2})들이 턴-온 동작되어 1차측 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})와 1차측 블록킹 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 2(a)와 같이 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진컨버터처럼 동작을 하게 된다.

2.4 제안된 양방향 전력수수 가능한 LLC 공진컨버터 전압이득 및 특성분석

제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터는 그림 4와 같이 1차측과 2차측에 각각 공진커패시터, 블록킹 커패시터와 보조스위치로 구성되어 있다. 순방향 동작모드와 역방향 동작모드에서 설명했듯이 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진이득특성을 얻기 위해서는 1차측 보조스위치(S_{A1} , S_{A2})와 2차측 보조스위치 (S_{A3} , S_{A4})를 턴-온, 턴-오프 동작시킴으로써 블록킹 커패시터(C_{B1} , C_{B2} , C_{B3} , C_{B4})와 공진커패시터(C_{r1} , C_{r2} , C_{r3} , C_{r4})의 연결동작에 의해 그림 2(a)와 같이 높은 이득특성을 갖는 LLC 공진컨

버터처럼 동작을 하게 된다.

그림 9(a)는 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터에 대한 주회로도이고, 그림 9(b)는 순방향 동작모드 경우의 등가회로를 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 C_1 은 1차측공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})의 합이고, C_2 는 2차측공진커패시터(C_{r3} , C_{r4})와 블록킹 커패시터(C_{B3} , C_{B4})의 합이다. L_{11} , N^2L_{12} 는 1차측, 2차측 누설인덕턴스, L_{m1} 은 자화인덕턴스를 나타내었다. 또한 역방향 동작모드 경우 그림 9(c)는 역방향 동작 시 그림 9(a)에 대한 등가회로를 나타낸 것으로 식 (1)에서와 같이 C_3 는 2차측공진커패시터(C_{r3} , C_{r4})의 합이고, C_4 는 1차측공진커패시터(C_{r1} , C_{r2})와 1차측 블록킹커패시터(C_{B1} , C_{B2})의 합이다. L_{12} , N^2L_{11} 는 1차측, 2차측 누설인덕턴스, L_{m2} 는 자화인덕턴스를 나타내었다. 등가부하저항은 부하저항, 정류다이오드 그리고 필터커패시터를 등가화한 $R_{AC}=4R_o/\pi^2$ 이고, 순방향 및 역방향 동작시 공진주파수는 식 (8)과 식 (9)처럼 공진커패시터와 블록킹커패시터의 병렬관계인 등가공진커패시터(C_{eq1} , C_{eq2})와 등가누설인덕턴스(L_{eq1} , L_{eq2})가 공진할 때의 등가공진주파수로 이를 식 (2)에 나타냈다. 그리고 순방향 및 역방향 동작시 각 무부하 상태에서의 등가주파수로서 식 (3)에 나타냈다. 식 (4)의 f_n 는 스위칭

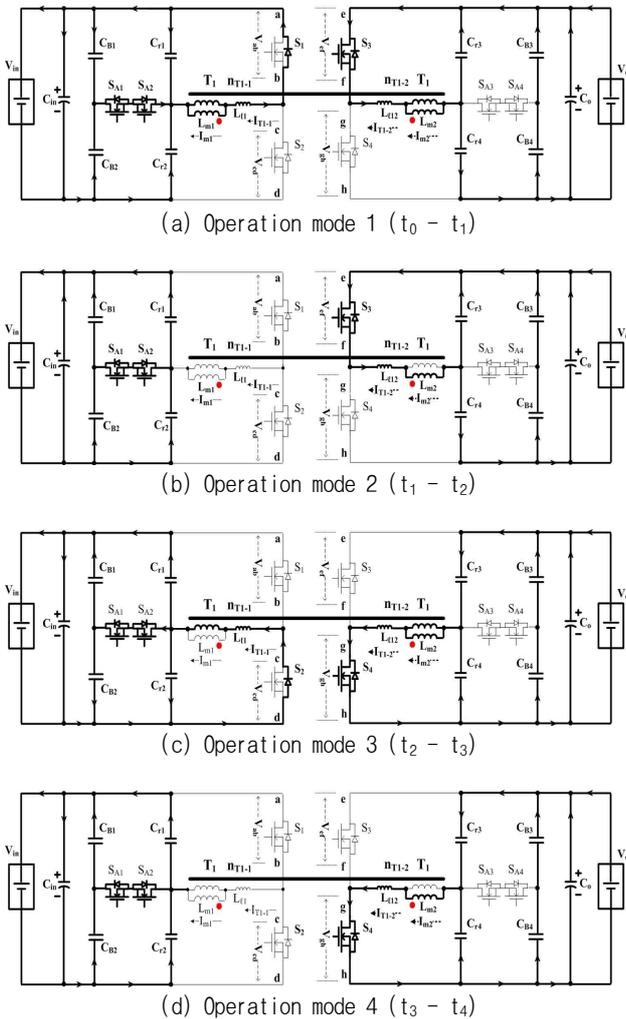


Fig. 8 Reverse operation mode

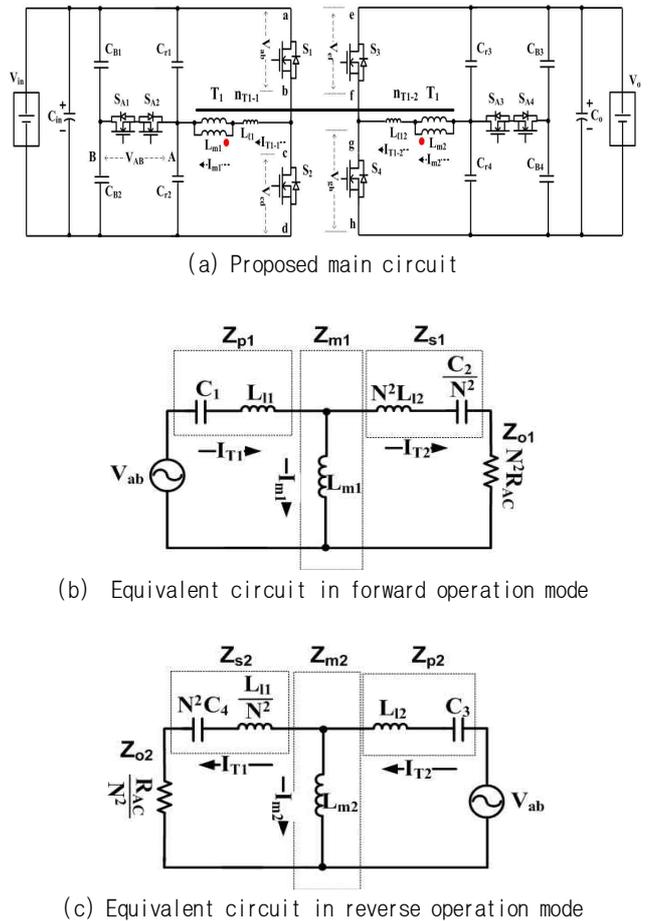


Fig. 9 Main circuit and equivalent circuit of the proposed resonant converter for bidirectional power transfer

주파수 f_s 와 공진주파수 f_r 의 비로써 규준화된 공진주파수를 나타낸 것이다. 그림 9(b)와 그림 9(c)의 등가회로와 식 (1)~(12)에 의하여 얻은 전압이득특성식(G_F , G_R)은 식 (13)와 식 (14)과 같다.

여기서,

$$C_1 = C_{r1} + C_{r2} \quad , \quad C_2 = (C_{r3} + C_{B3}) + (C_{r4} + C_{B4})$$

$$C_3 = C_{r3} + C_{r4} \quad , \quad C_4 = (C_{r1} + C_{B1}) + (C_{r2} + C_{B2}) \quad (1)$$

나타낼 수 있다.

식 (13)과 식 (14)와 표 1과 표 2를 적용하여 Math-CAD을 이용한 순방향 및 역방향 동작시 전압이득특성 시뮬레이션 결과는 그림 10(a)와 그림 10(b)에 나타냈다.

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq1}C_{eq1}}}, \quad f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq2}C_{eq2}}} \quad (2)$$

$$f_{o1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{m1}C_1}}, \quad f_{o2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{m2}C_3}} \quad (3)$$

$$f_n = \frac{f_s}{f_r} : \frac{\text{스위칭주파수 (Switching Frequency)}}{\text{공진주파수 (Resonant Frequency)}} \quad (4)$$

$$Z_{in1} = Z_{p1} + Z_{m1} // (Z_{s1} + Z_{o1}) : \text{Input Impedance (순방향시)}$$

$$Z_{in2} = Z_{p2} + Z_{m2} // (Z_{s2} + Z_{o2}) : \text{Input Impedance (역방향시)} \quad (5)$$

$$Z_{o1} = N^2 R_{AC} \quad , \quad Z_{o2} = \frac{R_{AC}}{N^2} \quad (6)$$

$$N = \frac{N_1}{N_2} \quad , \quad \frac{1}{N} = \frac{N_2}{N_1} \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{L_{l1}}{L_{m1}}, \quad B_1 = \frac{N^2 L_{l2}}{L_{m1}}, \quad A_2 = \frac{1}{N^2} \frac{L_{l1}}{L_{m2}}, \quad B_2 = \frac{L_{l2}}{L_{m2}} \quad (8)$$

$$L_{eq1} = L_{l1} + (L_{m1} // N^2 L_{l2}), L_{eq2} = L_{l2} + (L_{m2} // \frac{1}{N^2} L_{l1}) \quad (9)$$

$$C_{eq1} = \frac{C_1 \left(\frac{C_2}{N^2} \right)}{C_1 + \left(\frac{C_2}{N^2} \right)}, \quad C_{eq2} = \frac{C_3 (N^2 C_4)}{C_3 + (N^2 C_4)} \quad (10)$$

$$Q_1 = \frac{2\pi f_{r1} L_{eq1}}{R_{AC}}, \quad Q_2 = \frac{2\pi f_{r2} L_{eq2}}{R_{AC}} \quad (11)$$

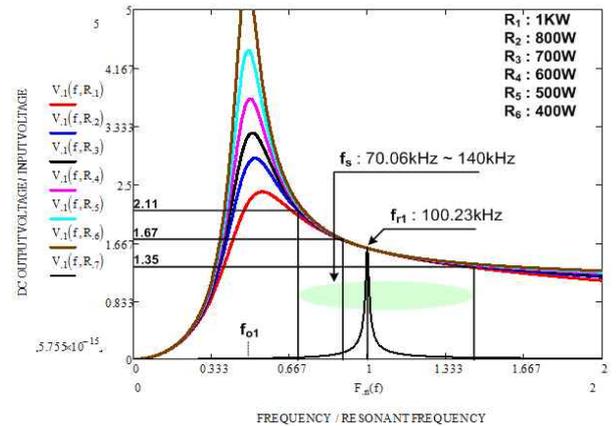
$$\alpha_1 = \frac{1}{2\pi f C_2 R_{AC}}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{2\pi f C_4 R_{AC}} \quad (12)$$

$$G_F = \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + A_1 - \left(\frac{f_{o1}}{f} \right)^2 + j\alpha_1 \left[B_1 - A_1 + \left(\frac{f_{o1}}{f} \right)^2 \right] + j \frac{1}{N^2} Q_1 (1 + B_1) \left(\frac{f}{f_{r1}} - \frac{f_{r1}}{f} \right)} \right| \quad (13)$$

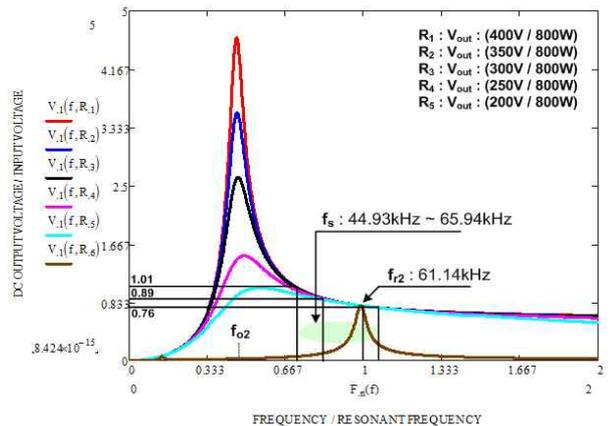
$$G_R = N \left| \frac{1}{1 + B_2 - \left(\frac{f_{o2}}{f} \right)^2 + j\alpha_2 \left[A_2 - B_2 + \left(\frac{f_{o2}}{f} \right)^2 \right] + j N^2 Q_2 (1 + A_2) \left(\frac{f}{f_{r2}} - \frac{f_{r2}}{f} \right)} \right| \quad (14)$$

3. 실험결과

본 논문에서는 800W 정격출력용량을 갖는 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터를 적용 실험하였다. 순방향 동작모드시 입력전압(V_{in}) 200~280V 조건에서 출력전압(V_o) 및 전류 I_o , 최대정격출력용량(P_o)[400W, 2A 800W]에 대해 각각 실험하였다. 그리고 역방향 동작모드시 출력전압(V_o) 400V 입력조건에서 입력단으로 출력되는 제어 전압(V_{in})조건에서 최대정격용량 300V/2.67A, 350V/2.29A, 400V/2.0A에 대해 각각 실험하였다. 적용된 그림 4의 제안된 컨버터의 실험조건과 주요정격에 대해 표 1과 표 2에 나타내었다.



(a) Voltage gain characteristics in forward operation mode



(b) Voltage gain characteristics in reverse operation mode

Fig. 10 Voltage gain characteristics due to the load variation in forward operation mode and reverse operation mode

Table 1 Design conditions

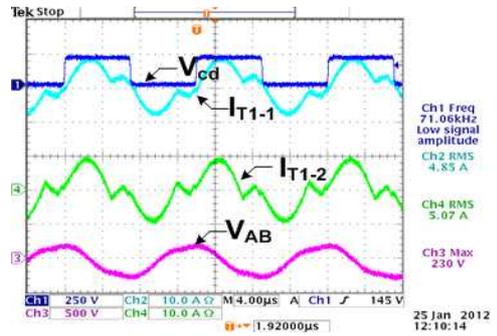
Forward mode	
Voltage(V_{in})	200V _{DC} ~ 280V _{DC}
Forward Power(P_o)	800W(400V _{DC} /2A)
Switching / Resonant Frequency(f_s/f_r)	71.06kHz~140.7kHz / 100.23kHz
Reverse mode	
Voltage(V_o)	400V _{DC}
Reversed Power(P_o)	800W(300V _{DC} ~400V _{DC} /2A~2.67A)
Switching / Resonant Frequency(f_s/f_r)	44.93kHz~65.94kHz / 61.14kHz

Table 2 Resonant converter parameters and devices

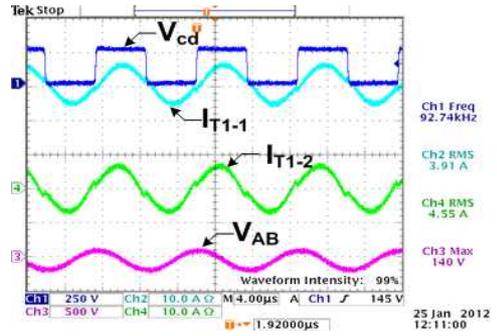
Self-inductance of primary and secondary(L_p, L_s)	81.4 μ H / 160.4 μ H
Leakage inductance of primary and secondary(L_{l1}, N^2L_{l2})	10.44 μ H/9.52 μ H
Equivalent inductance(L_{eq})	18.84 μ H
Turn ratio(N_1/N_2)	8.5/12
Resonant capacitors ($C_{r1}, C_{r2} / C_{r3}, C_{r4}$)	68nF/101nF
Blocking capacitors ($C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{B4}$)	2 μ H
Main switches(S_1, S_2, S_3, S_4)	FGH40N6S2D(600V/35A)
Forward auxiliary switches ($S_{A1}, S_{A2}, S_{A3}, S_{A4}$)	IHY30N160R2(1600V/30A)
IC controller	MC34067

그림 11은 그림 4의 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터 순방향 동작모드 실험 파형으로, 입력전압 (V_{in}) 200V_{dc} ~ 280V_{dc}의 입력조건에 대하여, 출력전압 (V_o) 400V_{dc} 전류(I_o) 2A, 출력용량 800W일 때, 단자전압(V_{cd}), 전류(I_{T1-1}, I_{T1-2})와 보조스위치 전압(V_{AB})를 측정 한 파형이다. 그림 11의 단자 전류(I_{T-1}, I_{T-2})를 보면, 모든 입력전압 및 부하범위에서 단자전압(V_{cd})에 대해서 지상 전류가 흘러 영전압 스위칭(ZVS : Zero Voltage Switching) 동작을 확인할 수 있다. 또한 그림 13(a)는 각 입력 전압 조건들에 대한 순방향 전력 전달에 대한 효율을 나타낸 표로, 입력전압(V_{in}) 200V_{dc} 일 때와 250V_{dc} 일 때에는 최대 효율이 97.02%로 높게 나왔으나, 입력전압(V_{in})이 280V_{dc}일 때에는 공진전류 연속 모드 동작으로 인해 2차측 출력 정류부에 적용된 Mosfet 역병렬 다이오드의 역회복 특성에 따른 손실에 의해 96.37%로 약간 낮은 효율 특성을 볼 수 있다.

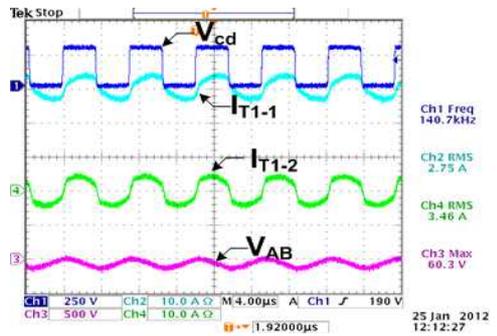
그림 12는 그림 4의 제안된 양방향 전력수수 가능한 공진컨버터 역방향 모드 실험 파형으로, 입력전압(V_{in}) 400V_{dc}일 때 출력전압(V_o) 300V_{dc} ~ 400V_{dc}에 대하여 800W일 때, 단자전압(V_{gh}), 전류(I_{T1-2}, I_{T1-1})와 보조스위치 전압(V_{cd})를 측정 한 파형이다. 그림 10(b)의 역방향 공진 이득 특성 시뮬레이션 결과와 비교하여 전압이득 특성 및, 동작스위칭 주파수 범위가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 12의 단자 전류(I_{T1-2}, I_{T1-1})를 보면, 모든 전압 및 부하 범위에서 단자전압 V_{gh} 에 지상 전류가 흘러 영전압 스위칭(ZVS : Zero Voltage Switching) 동작을 확인할 수 있다. 또한 그림 13(b)는



(a) Input voltage (V_{in}) : 200V_{dc}



(b) Input voltage(V_{in}) : 250V_{dc}



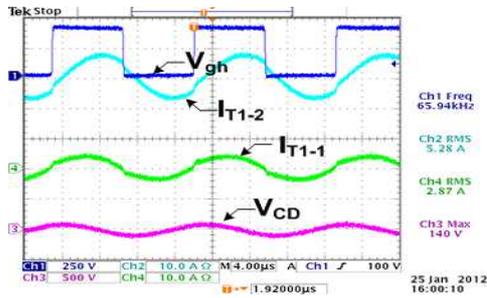
(c) Input voltage(V_{in}) : 280V_{dc}

Fig. 11 Experimental waveforms ($V_{cd}, I_{T1-1}, I_{T1-2}, V_{AB}$) in forward operation mode

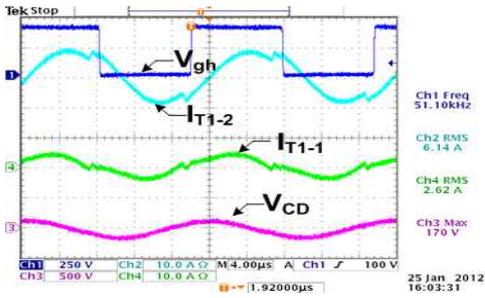
각 입력단 전압조건들에 대한 역방향 전력 전달에 대한 효율을 나타낸 표로, 최고 97.00%의 효율을 확인할 수 있었다.

4. 결론

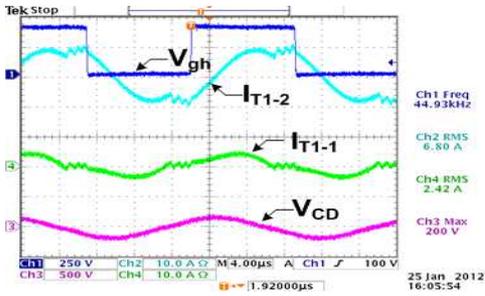
본 논문에서는 간단한 보조 스위치 및, 커패시터를 이용한 회로 구성으로 800W급 태양광 발전 계통 연계용 높은 이득특성을 갖는 양방향 전력수수가 가능한 공진 컨버터를 제안하였다. 적용 가능성을 확인하기 위해, 800W급의 시제품을 제작하여 실험하였고, 입력전압(V_{in}) 200V_{dc} ~ 280V_{dc} 와 출력전압(V_o) 300V_{dc} ~ 400V_{dc} 의 조건에서 순방향 및 역방향의 일정한 전력 전달을 확인하였고, 각각의 효율을 측정해본 결과 최고 97.02%의 높



(a) Output voltage (V_{in}) : $300V_{dc}$

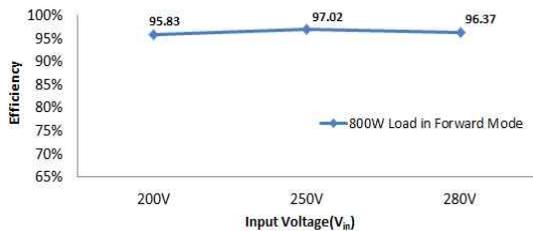


(b) Output voltage(V_{in}) : $350V_{dc}$

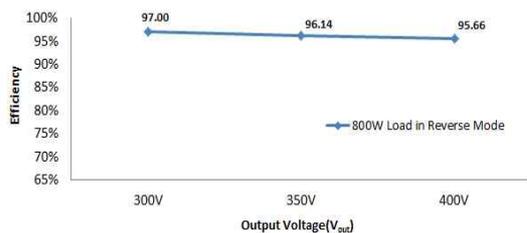


(c) Output voltage(V_{in}) : $400V_{dc}$

Fig. 12 Experimental waveforms (V_{gh} , I_{T1-2} , I_{T1-1} , V_{cd}) in reverse operation mode



(a) Efficiency characteristics in forward operation mode



(b) Efficiency characteristics in reverse operation mode

Fig. 13 Efficiency characteristics in (a) forward mode and (b) reversed mode conditions.

은 효율을 확인할 수 있었다. 또한 제안된 컨버터에 대한 전압이득 특성과 비교해본 결과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

향후 순방향 및 역방향 동작에 있어서 이득특성 개선 회로를 통해 모든 입력전압 및 부하범위에서 효율특성을 개선하고자 한다.

References

- [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*, pp. 599-606, 2005.
- [2] Gang Ma, Wenlong Qu, Gang Yu, Yuanyuan Liu, Ningchuan Liang, and Wenzhong Li, "Zero-Voltage-Switching Bidirectional DC-DC Converter With State Analysis and Soft-Switching-Oriented Design Consideration," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 6, pp. 2174-2184, June 2009.
- [3] 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, pp. 3075-3086, Sep. 2010.
- [4] Georg Pledl, Matthias Tauer, Dominik Buecherl, "Theory of operation, design procedure and simulation of a bidirectional LLC resonant converter for vehicular applications," in *Proc. IEEE VPPC(Vehile Power and Propulsion Conference)*, pp. 1-5, 2010.
- [5] Hyung-Jun Chae, Yun-Jae Lee, Su-Young Yun, Eun-Tae Oh, Kwang-min Yoo, Jun-Young Lee "3kW bi-directional DC-DC converter for Energy storage using unregulated BUS converter," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 408-410, July 2009.
- [6] "Bidirectional DC/DC Converter", Patent Pending (10-2011-0111497).

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



박준형(朴俊炯)

1987년 2월 9일생. 2011년 2월 전주대 전기 전자정보통신공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



이승민(李升珉)

1987년 3월 16일생. 2011년 8월 전주대 전기 전자정보통신공학부 졸업. 2013년 8월 동 대학원 졸업(석사). 현재 카코뉴에너지(주) 연구원.



김은수(金恩洙)

1964년 3월 26일생. 1986년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년~2001년 한국전기연구원 전력전자 연구그룹 선임연구원(T/L). 2001년~현재 전주대 전기전자공학과 교수. 당 학회 기획이사.



황인감(黃寅鉞)

1959년 1월 9일생. 1981년 연세대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 아리조나주립대 전기 및 컴퓨터학과 졸업(공학박사). 1984년~1986년 삼성전자연구소 주임연구원. 1993년~1995년 한국전자통신연구원 선임연구원. 1995년~현재 전주대 전기전자공학과 교수.



공영수(孔泳秀)

1977년 10월 24일생. 2003년 전주대 전기전자공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2006년~현재 국립과학수사연구소 연구원. 2011년~현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.