

넓은 입출력전압범위에서 동작 가능한 하이브리드 제어 양방향 LLC DC-DC 컨버터

전찬우¹, 공성운¹, 박주선¹, 김재섭², 전용석¹, 김은수^{†1}
 전주대학교¹, (주)다스텍²

Hybrid control bi-directional LLC DC-DC converter operating over a wide input/output voltage range

CW Jeon¹, SU Gong¹, JS park¹, JS Kim², YS Jeon¹, ES Kim^{†1}
 JeonJu University¹, Dasstech²

1. 서론

최근 에너지저장시스템(ESS, Energy storage system), 전기자동차(EV: Electrical Vehicle) 충·방전시스템(OBC: On-Board-Charger) 등 응용 분야에서 양방향 직류-직류(DC-DC) 컨버터 전력변환장치를 위해 CLLC 양방향 DC-DC 컨버터들이 연구 검토되고 있다. 하지만 CLLC 양방향 DC-DC 공진컨버터 1, 2차측에 공진커패시터(C_r , C_R)를 적용함에 따라 순방향 및 역방향 전력전달 동작 시 적용된 1차측 및 2차측 공진커패시터가 서로 상호 커플링 되어 동작함으로써 LLC 및 CCL 공진특성이 혼합된 CLLC 공진특성이 나타나게 되고, 특히 중부하로 갈수록 공진주파수(f_r)보다 낮은 주파수영역에서의 이득이 공진주파수(f_r)에서의 이득보다도 낮아지는 부(Negative)의 이득특성인 CCL 공진특성이 두드러지게 나타나게 되고, 이로 인해 하드스위칭 동작을 하게 된다. 이러한 이득특성을 개선하기 위해서는 변압기 자화인덕턴스(L_M)를 저감하여 이득을 끌어올릴 수 있지만 자화전류 증가에 따른 도통손실 증가로 인해 양방향 전력전달에 있어 효율개선이 어렵다. 그러므로 CLLC 공진특성에 따라 넓은 입·출력전압 제어에 한계성을 갖게 된다. 이를 해결하기 위하여 기 제안된 양방향 LLC DC-DC 컨버터^[1]는 1차측 및 2차측에 공진커패시터를 적용한다 할지라도 상호커플링 되지 않고 순방향 및 역방향 동작시 LLC 공진컨버터 고유의 이득특성을 갖고 동작 할 수 있다.

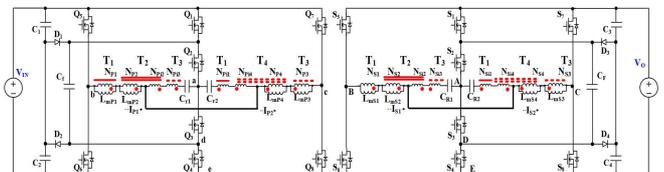
하지만, 기 제안된 양방향 LLC DC-DC 컨버터의 경우, 공진이득특성에서 입출력 부하용량이 증가함에 따라 양방향 전력전달 동작 시 공진주파수 (f_r , f_R) 이하의 주파수 영역에서 이득제어범위가 제한되는 부하 의존성을 갖는다. 이를 해결하기 위해서는 공진이득특성에서 부하 의존성을 줄일 수 있는 대안이 필요하다. 또한, 공진주파수(f_r , f_R) 이상의 주파수영역에서는 이득변화가 크게 없어 넓은 입출력 전압제어를 위한 이득제어에 한계가 있었다. 따라서 수 kW 부하에 적합하며 수십 kW 중대용량으로 증가시키는 데에는 한계와 어려움이 있었다.

본 논문에서는 넓은 입출력전압제어범위에 대응할 수 있는 중대용량 하이브리드 양방향 DC-DC 컨버터에 대한 내용으로, 공진주파수(f_r , f_R)에서는 부하와 관계없이 이득변화가 없으므로 공진주파수(f_r , f_R) 또는 공진주파수 근처 고정된 스위칭 주파수에서 위상제어(PM: Phase-shifted Modulation)를 통해 이득제어를 수행하고, 위상제어 PM(θ_p)가 최대($\theta_p=0.5$) 또는 최소($\theta_p=0-0.1$)가 되었을 때 이득제어 범위를 더 높게 또는 더 낮게 제어할 수 있도록 가변 스위칭 주파수제어(FM: Frequency Modulation)를 통해 보다 넓은 범위로 입출력 전압을 제어할 수 있는 하이브리드 스위칭 방식을 적용한 20kW 양방향 LLC 직류-직류(DC-DC) 컨버터를 제안하고 시뮬레이션을 통해 검증한다. 또한, 3kW의 실험을 통해 실제 적용 가능성을 확인한다.

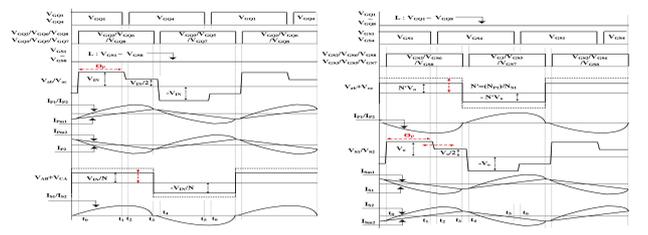
2. 하이브리드 양방향 LLC 공진컨버터

본 논문에서 제안된 하이브리드 양방향 LLC 컨버터는 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 1차측 입력단 및 2차측 출력단 양단에 스위칭소자(1차측: Q_5-Q_6 , $Q_1-Q_2-Q_3-Q_4$, Q_7-Q_8 , 2차측: S_5-S_6 , $S_1-S_2-S_3-S_4$, S_7-S_8)들이 각각 병렬 연결되어 있고, 분압 커패시터(1차측: C_1-C_2 , 2차측: C_3-C_4)와 플라잉커패시터(Flying Capacitor, 1차측: C_f , 2차측: C_F) 사이에 2개의 순환다이오드(1차측: D_1-D_2 , 2차측: D_3-D_4)들이 각각 1, 2차측에 연결되어 있다. 공진리액턴스(1차측: C_{r1}/C_{r2} , 2차측: C_{R1}/C_{R2}) 일단은 중간 스위칭소자(1차측: $Q_1-Q_2-Q_3-Q_4$, 2차측: $S_1-S_2-S_3-S_4$)의 소스와 드레인과 사이에 연결되어 있다. 각 공진리액턴스(1차측: C_{r1}/C_{r2} , 2차측: C_{R1}/C_{R2})는 각 변압기 1, 2차측 주권선(1차측: N_{P1}/N_{P2} , 2차측: N_{S1}/N_{S2})에 공통으로 묶은 선에 연결되어 있다. 따라서 하이브리드 스위칭 방식을 적용한 양방향 LLC 컨버터 순방향 및 역방향 전력전달에 있어서 정류 동작시 1차측 및 2차측 변압기(T_1 , T_2)권선 전압극성에 따라 공진리액턴스(1차측: C_{r1}/C_{r2} , 2차측: C_{R1}/C_{R2})를 통해 공진전류가 흐르지 않고 공통연결선을 통해 우회하며 정류 동작됨으로 고유의 LLC 공진특성을 가지고 부하에 크게 영향을 받지 않고 위상제어(PM) 및 가변스위칭 주파수제어(FM)에 따라 양방향 전력전달 할 수 있다.

그림 1에 나타난 제안된 하이브리드 양방향 LLC DC-DC 컨버터는 공진주파수(f_r) 부근의 고정된 일정스위칭주파수(f_s)에서 위상제어(PM)를 통해 1차측 각 공진탱크회로단자(a-b, a-c)에 V_{IN} 전압 및 $V_{IN}/2$ 전압이 인가하여 전력전달 제어하고, 높은 입출력 전압제어에서는 공진주파수(f_r) 아래 영역에서 가변스위칭 주파수제어(FM)를 통해 제어하는 방식이다.



(a) 제안된 양방향 LLC DC-DC 컨버터



(b) 순방향 동작파형 (c) 역방향 동작파형

그림 1. 하이브리드 양방향 LLC DC-DC 컨버터 및 동작파형

순방향 및 역방향 전력전달동작시 위상제어(PM(Θ_p)) Mode 1) 동작모드에 대해 설명하면, 하이브리드 양방향 LLC DC-DC 컨버터 공진주파수(f_r) 부근 고정된 일정 스위칭주파수에서 위상제어를 통해 1차측 각 공진 탱크회로 단자(a-b, a-c)에 입력단 전압 V_{IN} 전압에서 $V_{IN}/2$ 전압이 인가되어 전력 전달을 제어하는 방식이다. 가변 스위칭주파수제어 동작모드 2(FM, Mode 2)에서는 하이브리드 양방향 LLC DC-DC 컨버터의 위상제어 동작모드 1(PM Mode 1)에서 최대 위상제어(In-Phase, $\Theta_p=0.5$)에 따라 출력 전압단전압이 $V_o/2$ 에서 V_o 로 상승하였기 때문에 1차측으로 유도되는 변압기 자화인덕턴스(L_{mP1} , L_{mP2})에 흐르는 자화전류(I_{mP1} , I_{mP2})의 증가로 공진이득특성이 개선될 수 있다. 따라서 공진주파수(f_r)에서부터 최소스위칭주파수범위(f_{min})까지 가변스위칭주파수제어 동작모드 2(FM, Mode 2)를 통해 보다 넓은 입,출력 전압제어범위($V_o \sim$)로 동작할 수 있다. 가변스위칭주파수제어 동작모드 3(FM, Mode 3)에 대해 설명하면, 하이브리드 양방향 LLC DC-DC 컨버터의 위상제어(PM 동작모드1(PM Mode 1)에서 최소위상제어(Out-Phase, $\Theta_p=0$)에 따라 출력전압이 V_o 에서 $V_o/2$ 로 감소하였기 때문에 그 이상 이득을 낮추기 위해서는 최소위상제어(Out-Phase, $\Theta_p=0$) 조건에서 공진주파수(f_r)에서부터 최대스위칭주파수 범위(f_{max})까지 가변스위칭주파수제어(f_s) 동작모드 3(FM, Mode 3)를 통해 보다 낮은 출력전압제어범위($V_o/2$)로 동작할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션 및 실험에 적용된 입력전압(V_{IN})은 700V_{DC}, 출력 전압(V_o)는 200V_{DC}~400V_{DC}이고, 공진회로 파라미터를 표 1에 나타냈다.

표 1. 공진회로 파라미터

파라미터	1, 2차측 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})/(C_{R1}, C_{R2})	125 nF / 575 nF
	순방향 및 역방향 공진주파수 (f_r , f_R)	100 kHz / 100 kHz
순방향 동작	1, 2차측 자기인덕턴스(L_{PF1}, L_{PF2})/(L_{SF1}, L_{SF2})	50.07 uH / 4.02 uH
	등가누설인덕턴스(L_{eq3} , L_{eq4})	10.42 uH / 10.42 uH
	순방향 턴수비 (T1/T2)	$N_p = (N_{p1}+N_{p11}/N_{s1} = N_{p2}+N_{p12}/N_{s2})$ 3.75 [15(12+3)T / 4T]
역방향 동작	1, 2차측 자기인덕턴스(L_{PR1}, L_{PR2})/(L_{SR1}, L_{SR2})	31.75 uH / 12.03 uH
	등가누설인덕턴스(L_{eq3} , L_{eq4})	2.19 uH / 2.19 uH
	순방향 턴수비 (T1/T2)	$N_p = (N_{p1} / N_{s1}+N_{s11} = N_{p2} / N_{s2}+N_{s12})$ 1.714 [12T / 7(4+3)T]

그림 2의 순방향 이득특성에 나타난 바와 같이 1차측 주회로 순방향동작은 위상제어(PM(Θ_p)) Mode 1)와 가변스위칭주파수제어(FM Mode)2, 3을 통한 동작모드의 선택적 하이브리드 스위칭방식을 적용함으로써 보다 넓은 입출력전압제어범위를 갖고 동작할 수 있다. 역방향 동작은 1차측과 대칭회로이므로 동일하게 동작되기에 본 논문에서는 상세 설명하지 않았다.

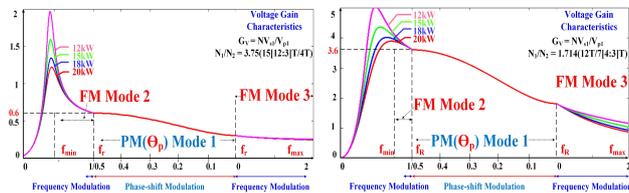


그림 2. 순방향동작 이득특성

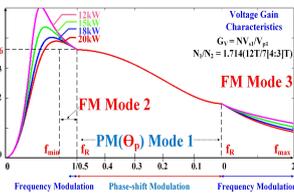


그림 3. 역방향동작 이득특성

하이브리드 양방향 LLC컨버터의 이득특성에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 공진주파수(f_r , f_R)를 기준으로 승압 및 강압되어 넓은 입출력전압제어 가능 하는지에 대해 검증하였다. 표 1에 나타난 입출력사양과 이를 구현하기 위한 제작 변압기 파라미터, 순방향 및 역방향 이득특성과 공진주파수를 고려하여 파형을 나타냈다. 그림 4와 그림 5는 순방향 및 역방향 전력 전달 동작 시의 시뮬레이션 동작 파형을 나타냈으며, 그림 6과

그림 7은 순방향 및 역방향 실험 동작 파형을 나타냈다.

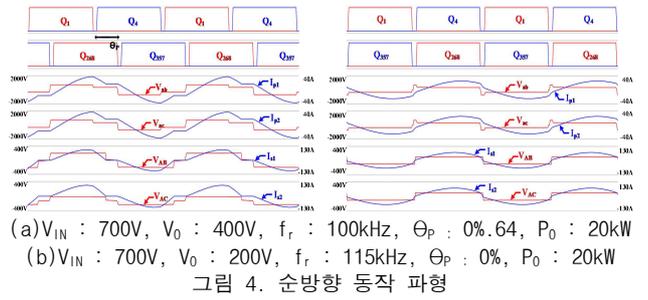


그림 4. 순방향 동작 파형

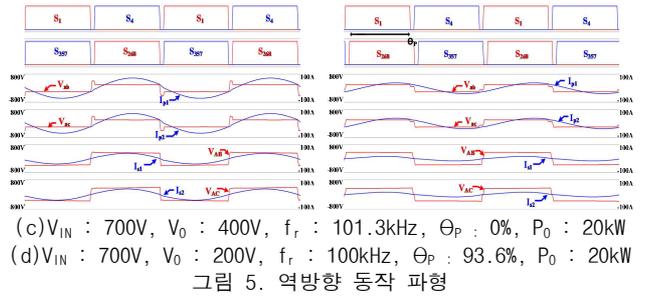


그림 5. 역방향 동작 파형

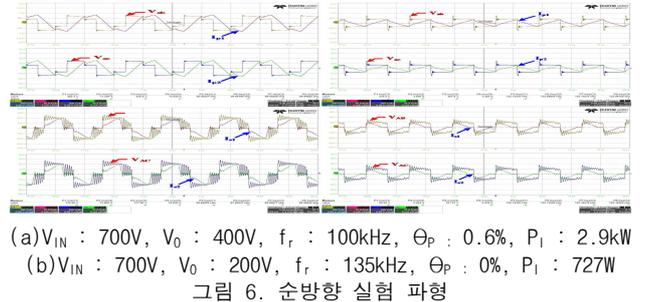


그림 6. 순방향 실험 파형

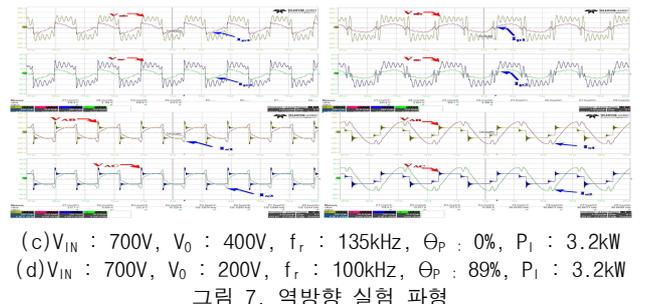


그림 7. 역방향 실험 파형

4. 결론

본 논문에서는 양방향 동작 시, 일정 스위칭 주파수에서 위상제어(PM)와 가변 스위칭주파수제어(FM)를 접목한 하이브리드 제어방식을 통해 입력전압(V_{in} : 700V_{dc}), 출력전압(V_o : 200V_{dc} ~ 400V_{dc}) 및 20kW 제어범위에서 양방향 동작 가능함을 확인하였다. 또한, 3kW의 실험을 통해 실제 적용 가능성을 확인하였다.

본 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2022400000220, 전북지역에너지클러스터 인재양성)

참고 문헌

- [1] K.C Jang, J.W Woo, E.S Kim, "A Bidirectional LLC Resonant Converter with Wide Input and Output Voltage Gain Characteristic", in Proceedings of KIPE Summer Conference, pp. 436-437, July 2021.
- [2] E.S. Kim, C.W Jeon, "Bidirectional LLC DC-DC Converter", Korea Patent Pending 2023. 11.~12.