

2차측 LLC 공진회로 적용 인터리브 컨버터

김상규, 문유진, 유준우, 김은수[†]
전주대학교

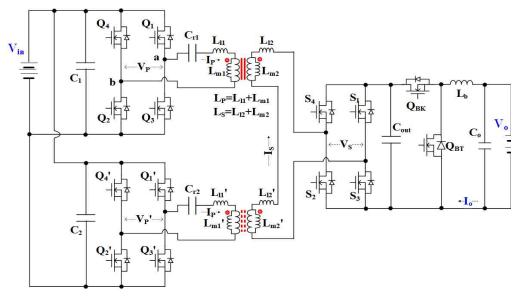
Interleaved Converters Using S-LLC Resonant Circuit

Sang-Kyu Kim, Yu-Jin Moon, Jun-Woo Yoo, Eun-Soo Kim[†]
JeonJu University

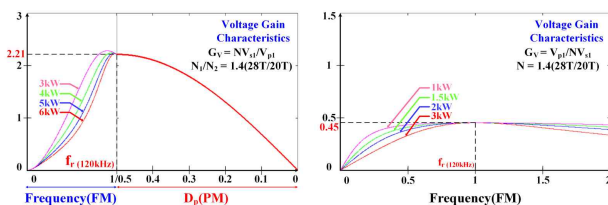
1. 서론

전기자동차(EV: Electric Vehicle), 에너지저장시스템(ESS) 등의 스마트그리드 시스템을 위한 절연형 양방향 DC-DC 컨버터 필요성이 증대되고 있다. 이를 위한 DC-DC 컨버터로 가변 스위칭주파수제어(FM, Frequency Modulation)를 통해 이득제어 할 수 있는 풀-브리지 P(Primary)-LLC 공진컨버터가 적용되고 있다. 하지만 공진주파수(f_r) 이상에서는 이득변화가 크게 없고, 높은 스위칭주파수(f_s) 동작영역에서는 출력정류다이오드 및 변압기 2차측 권선에 존재하는 기생커패시턴스(C_p)에 따라 이득이 상승하여 넓은 출력전압제어범위에 한계가 있었다.

이를 개선하기 위해 그림 1(a)와 같이 1차측은 병렬로 두 개의 풀-브리지 LLC 공진컨버터가 연결되어 있고, 변압기 2차측 권선이 항상 직렬연결 동작 되도록 구성된 스위칭정류부를 갖는 인터리브(Interleaved) P-LLC 풀-브리지 DC-DC 컨버터가 검토되고 있다^[1]. 하지만, 순방향 동작시 낮은 출력전압(V_o) 제어를 위해 위상제어(PM, Phase-Shift Modulation)가 최소로 제어될 경우 변압기 1차측 자화전류($I_p=I_{m1}$, $I_p'=I_{m1}'$)가 흐르지 않아 풀-브리지 P-LLC 공진컨버터 스위칭소자들이 하드스위칭 및 전류불평형이 발생한다. 또한 그림 1(c)에 나타낸바와 같이 역방향동작(Reverse Operation)시는 승·강압 할 수 있는 LLC 공진이득특성이 아닌 SRC(Series Resonant Converter) 이득특성을 가져 전압제어가 되지 않음으로 승·강압제어 할 수 있는 2차측에 별도로 비절연 승·강압컨버터(Buck-Boost Converter)가 필요함으로 효율저감 등 단점을 갖는다.



(a) 인터리브 풀-브리지 P-LLC 공진컨버터



(b) 순방향시 위상제어 이득특성 (c) 역방향시 주파수제어 이득특성
그림 1. 인터리브 풀브리지 P-LLC 공진컨버터와 이득특성

본 논문은 양방향 DC-DC 컨버터 동작이 가능하고 각 공진 탱크의 1차측 전류(I_{p1} , I_{p2}) 불평형을 저감할 수 있도록 2차측에 하나의 공진회로를 적용한 인터리브 S(Secondary)-LLC 양방향 DC-DC 컨버터를 제안하고^[2] PSIM 시뮬레이션을 바탕으로 제안된 컨버터의 타당성 및 적용 가능성을 검증하였다.

2. 인터리브 S-LLC 양방향 DC-DC 컨버터

그림 2에 나타낸 바와 같이 고정된 입력전압($700 V_{DC}$)을 입력전원으로 하여 절연된 넓은 출력전압제어범위($0 V_{DC} \sim 840 V_{DC}$)를 갖는 S-LLC 공진회로 적용 위상제어(PM) 인터리브 DC-DC 컨버터는 스위칭소자(Q_1/Q_4 , Q_2/Q_3 , Q_1'/Q_4' , Q_2'/Q_3')로 구성된 풀-브리지 단자(a-b, c-d)에 각각 개별공진회로가 적용되는 것 대신에 DC 바이어스를 막아주기 위한 DC 블로킹커패시터(C_{B1} , C_{B2})와 변압기(T_1 , T_2) 1차측 권선이 연결되어 있고, 변압기(T_1 , T_2) 2차측 권선은 직렬연결 되어있다. 이때 1, 2차측 누설인덕턴스(L_{l1} , L_{l1}' , L_{l2} , L_{l2}')와 2차측 공진커패시터(C_s)로 구성된 하나의 공진회로를 적용함으로써 순방향 동작 시 변압기(T_1 , T_2) 1, 2차측 누설인덕턴스(L_{l1} , L_{l1}' , L_{l2} , L_{l2}')와 2차측 공진커패시터(C_s)와의 공진을 이용하여 인터리브 위상제어(PM, D_p)를 통해 순방향 전력전달하고, 역방향 동작 시 변압기(T_1 , T_2)의 자화인덕턴스(L_{m1} , L_{m1}')와 누설인덕턴스(L_{l1} , L_{l1}' , L_{l2} , L_{l2}')로 구성된 등가누설인덕턴스 및 2차측공진커패시터(C_s)와 공진이득특성에 따른 가변스위칭주파수제어(FM)를 통해 역방향전력 전달됨으로써, 양방향 모두 공진이득특성을 갖는다. 또한, 과부하 및 단락부하에도 위상변이제어(D_p)를 0(Out-Phase)로 저감하여 출력전압(V_o)을 0V로 감소시켜 과부하 또는 단락전류를 제한할 수 있다.

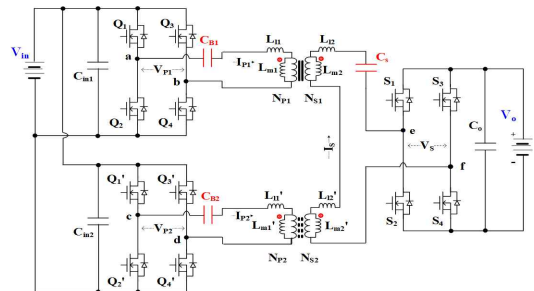
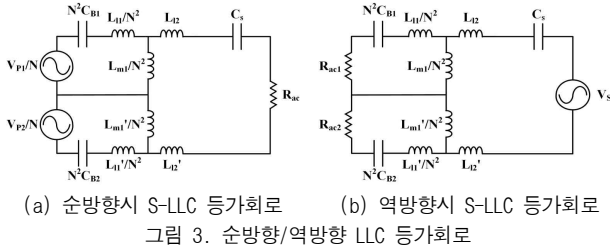


그림 2. 제안된 위상제어(PM) 인터리브 S-LLC 양방향 DC-DC 컨버터

3. S-LLC 양방향 DC-DC 컨버터 이득특성

그림 3은 인터리브 S-LLC 양방향 DC-DC 컨버터의 순방향과 역방향시의 공진회로부 등가회로를 나타내었다. 등가회로는 2차측에서 바라보았을 때의 기준으로 표현하였으며 L_{l1} 과 L_{l2} 는 1, 2차측 누설인덕턴스이고 L_m ($L_{m1}=L_{m1}'$)은 자화인덕턴스이다. C_s 는 2차측 공진커패시터이며 C_B 는 DC 바이어스를 막아주기

위한 블로킹커패시터이다. 순방향 동작시와 역방향 동작시의 S-LLC 등가회로에 대한 입출력 이득특성(G_V)을 식 (1)과, 식 (3)를 통해 나타냈고 순방향 제어 시 변압기(T_1 , T_2)의 1차측 양단 전압(V_{PS1} , V_{PS2})의 합 전압을 FHA(Fourier Harmonic Analysis)를 적용함에 따라 식 (2)를 구하고 위상제어(PM, D_p)에 따른 입·출력이득특성(G_{VF})을 그림 4(a)에 나타내었다. 또한 역방향 동작 시 주파수 변화에 대한 입·출력이득특성(G_{VR})은 그림 4(b)에 나타내었다.

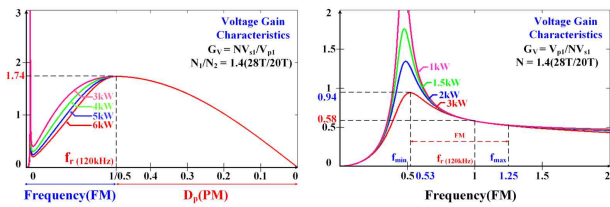


$$G_{VF} = 2 \left| \frac{1}{1 + \frac{L_m}{L_m'} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_2}} + \frac{j\omega}{R_{dc}} \left(\frac{2}{N^2} \left(L_m - \frac{1}{\omega^2 C_2} \right) + \left(1 + \frac{L_m}{L_m'} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_2} \right) \left(2L_m - \frac{1}{\omega^2 C_2} \right) \right) \right| \quad (1)$$

$$G_{DP} = \sqrt{2 - 2\cos(n\pi D_p)} \sin \left(\omega + \arcsin \left(\frac{\sin(n\pi D_p)}{\sqrt{2 - 2\cos(n\pi D_p)}} \right) \right) \cdot G_{VF} \quad (2)$$

$$G_{VR} = \left| \frac{1}{2 + N^2 \left(\frac{2L_m}{L_m'} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_2} \right) + \frac{j\omega}{R_{dc}} \left[N^2 \left(2L_m - \frac{1}{\omega^2 C_2} \right) \left(1 + \frac{1}{L_m} \left(L_m - \frac{1}{\omega^2 C_2} \right) \right) + 2 \left(L_m - \frac{1}{\omega^2 C_2} \right) \right]} \right| \quad (3)$$

$$C_B = C_{B1} = C_{B2} \quad L_{p1} = L_{l1} = L_{l1}' \quad L_{s1} = L_{l2} = L_{l2}' \quad L_m = L_{m1} = L_{m1}'$$



4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안된 S-LLC 공진회로 적용 인터리브 DC-DC 컨버터를 PSIM 시뮬레이션을 사용하여 타당성을 검증하였다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 순방향 동작 시 입력전압 (V_{in} : 700 V_{DC})에서 위상제어(PM, D_p : 0~0.5)를 통해 넓은 출력전압제어범위(V_o : 0 V_{DC}~840 V_{DC})로 동작하며 1차측 단자전류(I_{P1} , I_{P2}) 불평형이 저감된 것을 확인하였다. 또한, 그림 4(a)에 나타낸 위상제어에 따른 이득특성에 따라 위상변이제어(D_p)를 0(Out-Phase)으로 저감할 경우 출력전압(V_o)이 0V로 감소되어 과부하 또는 단락전류에 대응하여 제한할 수 있음을 그림 7의 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

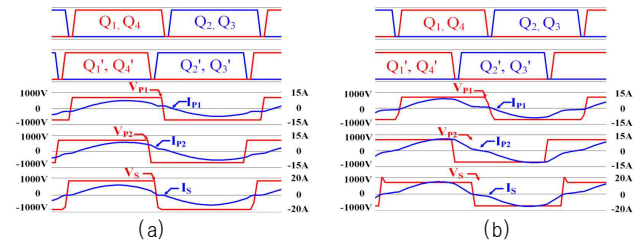
그림 6의 역방향 동작 시 스위칭주파수(f_s)는 공진주파수(f_r)를 기준으로 최대스위칭주파수(f_{max})에서부터 낮은 최소스위칭주파수(f_{min})까지 가변스위칭주파수제어(FM)를 통해 출력전압 변동범위(V_o : 540 V_{DC}~840 V_{DC})에 대응하여 입력단전압(V_{in} : 700 V_{DC})을 제어함을 볼 수 있다.

순방향과 역방향 모두 1, 2차측 단자전압(순방향 시 V_{P1} , V_{P2} /역방향 시 V_S)보다 지연된 공진전류(순방향 시 I_{P1} , I_{P2} /역방향 시 I_S)가 흐르기 때문에 1, 2차측 스위칭소자들은 모두 영전압스위칭(ZVS) 동작이 원활히 작동하는 것을 확인하였다.

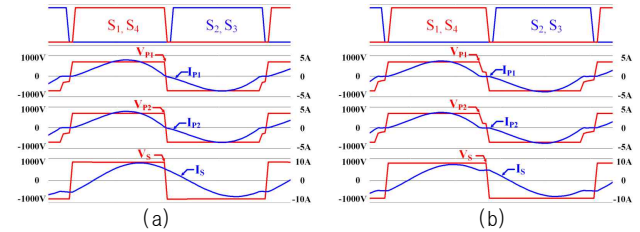
따라서 2차측 하나의 LLC 공진회로를 갖는 인터리브 S-LLC DC-DC 컨버터 활용 시 개별공진회로를 갖는 인터리브 풀-브리지 LLC DC-DC 컨버터와 달리 1차측 단자전류(I_{P1} , I_{P2})의 불평형을 저감할 수 있으며 또한 별도의 승·강압 컨버터 없이 양방향 동작이 가능하다.

표 1. 순방향 및 역방향 입출력사양 및 변압기(T_1 , T_2) 파라미터

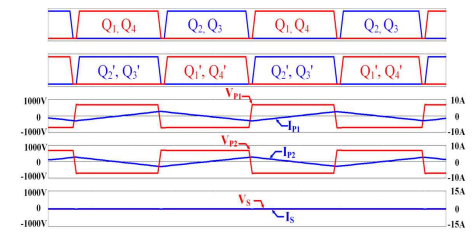
주요 정격	입력전압(V_{in})	700 V _{DC}
	순방향 출력전압(V_o)/출력(P_{out})	0 ~ 840 V _{DC} /6 kW
주요 정격	역방향 출력전압(V_o)/출력(P_{out})	540 ~ 840 V _{DC} /3 kW
	공진주파수(f_r)	120 kHz
주요 정격	순방향 스위칭주파수(f_s)	120 kHz
	역방향 스위칭주파수(f_s)	65 kHz ~ 150 kHz
파라미터	$C_1/C_{B1}/C_{B2}$	16 nF/2 uF
변압기 파라미터	1/2차측 자기인덕턴스 (L_p/L_s)	623.9 uH/307 uH
	1/2차측 누설인덕턴스 ($L_{l1}/N^2 L_{l2}$)	67.45 uH/45.64 uH
변압기 파라미터	자화인덕턴스 (L_m/L_{m1})	439.9 uH
	턴-수비 ($N(N_1/N_2)$)	1.4(28T/20T)



(a) V_{in} : 700 V_{DC}, f_s : 120 kHz, I_{P1_rms} : 5.21 A, I_{P2_rms} : 5.9 A, V_o : 840 V_{DC}, I_o : 7.14 A (b) V_{in} : 700 V_{DC}, f_s : 120 kHz, I_{P1_rms} : 5.76 A, I_{P2_rms} : 7.45 A, V_o : 700 V_{DC}, I_o : 8.57 A



(a) V_o : 840 V_{DC}, I_o : 5.02 A, f_s : 115.4 kHz, I_{P1_rms} : 2.4 A, I_{P2_rms} : 2.4 A, V_{in} : 700 V_{DC} (b) V_o : 700 V_{DC}, I_o : 5.09 A, f_s : 108.6 kHz, I_{P1_rms} : 2.45 A, I_{P2_rms} : 2.45 A, V_{in} : 700 V_{DC}



이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224000000220, 전북 지역에너지 클러스터 인재양성)

참고 문헌

- [1] B. Xue, H. Wang, J. Liang, Q. Cao and Z. Li, "Phase-Shift Modulated Interleaved LLC Converter With Ultrawide Output Voltage Range," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 1, pp. 493-503, Jan. 2021
- [2] Eun-Soo Kim, "Interleaved Converters Using The Secondary LLC Resonant Circuit, And Power Converting Apparatus Using The Same", Patent, 2023.