

하나의 양방향 스위치를 이용한 넓은 출력 전압을 갖는 LLC 공진형 컨버터

홍은진, 김종우
전기전자공학부, 건국대학교

Design LLC resonant converter with wide output voltage using a bidirectional switch

Eun-jin Hong and Jong-woo Kim

ABSTRACT

전기차 충전을 위한 LLC 컨버터는 넓은 출력 전압 범위를 제공해야하므로 3개의 릴레이를 사용해 LLC 컨버터 2개의 출력을 직/병렬 연결하여 출력 전압 범위를 넓히는 방식이 사용된다. 하지만 이 구조는 다수의 추가 소자가 필요하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 하나의 양방향 스위치만 추가한 넓은 출력 전압 범위를 갖는 LLC 컨버터의 새로운 구조를 제안한다. 제안하는 컨버터의 타당성을 확인하기 위해 제작된 LLC 컨버터는 150~1000V의 출력 전압 범위를 내며 3.3kW/11A의 최대 출력 조건을 가진다.

1. 서론

전기 자동차 배터리는 제조사에 따라 400V급 또는 800V급이 사용된다. 400V급 배터리는 150~500V의 출력 전압 범위를, 800V급 배터리는 300~1000V의 출력 전압 범위를 갖는다. 따라서 400V와 800V급 배터리를 모두 고려하여, 전기차 배터리 충전기는 150~1000V의 넓은 출력 전압 범위를 가져야 한다.

전기차 배터리 충전기에는 LLC 공진형 컨버터가 널리 사용된다. 이는 낮은 전자기 간섭, 높은 전력 밀도 그리고 높은 효율을 가지고 있기 때문이다.^[1] 하지만 LLC 컨버터의 경우, 주파수 제어를 사용하므로 동작 전압 범위가 확장될수록 스위칭 주파수의 범위가 넓어져야 한다. 기존 LLC 컨버터는 넓은 출력 전압 범위에서 동작하기 위해 동작하기 위해 자성 소자의 크기가 커지고 효율이 감소하는 한계를 가진다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 3개의 릴레이를 사용하여 LLC 컨버터 2개의 출력을 직/병렬로 연결하는 구조가 제안되었다.^{[2][3]} 2차측에 추가된 3개의 릴레이로 두 개의 출력 커패시터를 직/병렬 연결하여 출력 전압 범위를 넓힐 수 있다. 하지만 이 구조는 다수의 추가 소자가 필요하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 하나의 양방향 스위치만을 사용하여 넓은 출력 전압 범위를 갖는 LLC 컨버터를 제안하였다.

2. 제안하는 넓은 출력 전압 범위의 LLC 컨버터

2.1 제안하는 컨버터의 구조

그림1은 제안하는 컨버터를 나타낸다. 제안하는 컨버터는 1차측에 하프 브릿지 LLC 컨버터 하나를 가지고, 3권선 변압기와 2개의 풀브릿지 정류단으로 이루어져 있다. 양방향 스위치

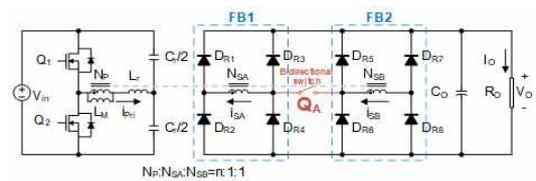


그림 1 제안하는 컨버터

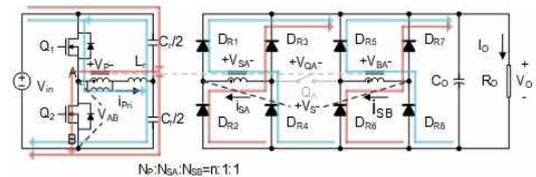


그림 2 400V급 배터리 충전 시 제안하는 컨버터의 전류 흐름

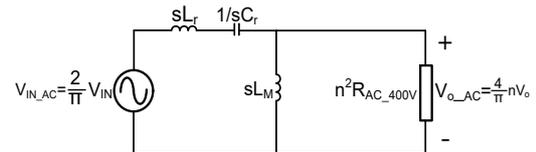


그림 3 400V급 배터리 충전 시 제안하는 컨버터 AC 등가 회로

QA는 충전하는 배터리의 전압에 따라 3권선 변압기의 두 2차측 권선이 직렬로 연결되거나 떨어지도록 한다.

2.2 제안하는 컨버터의 동작 및 분석

2.2.1 400V급 배터리 충전 시 동작

그림2는 400V급 배터리를 충전할 때 제안하는 컨버터의 전류 흐름을 보여준다. 이때, 양방향 스위치 QA는 꺼져 두 개의 풀 브릿지 정류단을 병렬로 연결한다. ISA와 ISB는 출력 전류의 절반을 전달하며 VSA는 ±VO가 번갈아 인가된다. 변압기의 2차측 턴 수가 동일하므로 2차측을 턴 비가 n인 변압기 1개와 풀브릿지 정류단으로 등가화가 가능하다. 그러므로 400V급 배터리 충전 시 AC등가 저항(RAC400V)은 아래와 같다:

$$R_{AC400V} = \frac{v_{S_F}}{i_{S_F}} = \frac{4V_O/\pi}{\pi I_O/2} = \frac{8}{\pi^2} R_O \quad (1)$$

제안하는 컨버터의 Q factor(Q400V)는 기존 LLC 컨버터와 같은 방식으로 정의된다:

$$Q_{400V} = \frac{1}{n^2 R_{AC400V}} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \frac{\pi^2}{8n^2 R_O} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2)$$

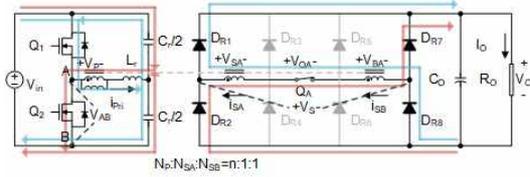


그림 4 800V급 배터리 충전 시 제한하는 컨버터의 전류 흐름

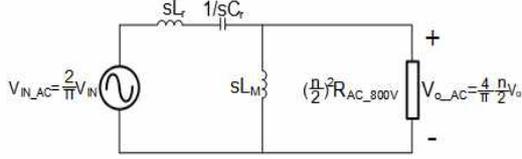


그림 5 800V급 배터리 충전 시 제한하는 컨버터 AC 등가 회로

그림3의 AC 등가 회로를 통해 400V급 배터리 충전 시 제한하는 컨버터의 입출력 전압 변환비(G_{400V})는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$G_{400V} = \frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{1}{2n \sqrt{\left[1 + \frac{1}{k} \left(1 - \left(\frac{f_R}{f_S}\right)^2\right)\right]^2 + \left[Q_{400V} \left(\frac{f_R}{f_S} - \frac{f_S}{f_R}\right)\right]^2}} \quad (3)$$

400V급 배터리 충전 시, 제한하는 컨버터의 유효 턴 비는 $2n$ 이다. 이때, f_S 는 제한하는 컨버터의 스위칭 주파수, $n=N_p/N_s$, $k=L_m/L_r$ 그리고 $f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}}$ 이다.

2.2.1 800V급 배터리 충전 시 동작

그림 4는 800V급 배터리를 충전할 때 제한하는 컨버터의 전류 흐름을 보여준다. 양방향 스위치 Q_A 가 켜져 변압기의 2차측 권선이 직렬로 연결된다. 출력 전류의 총량만큼 직렬 연결된 권선에 흐르고 V_O 가 직렬 연결된 권선에 가해져 V_{SA} 에는 전압 분배에 의해 $\pm V_O/2$ 가 변압되어 인가된다. 턴비가 $n/2$ 인 변압기 1개와 풀브릿지 정류단으로 등가화가 가능하다. 400V급 배터리와 동일하게 800V급 배터리 충전 시 AC 등가 저항(R_{AC800V}), Q factor(Q_{800V}) 그리고 입출력 전압 변환비(G_{800V})는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$R_{AC800V} = \frac{V_{S_F}}{I_{S_F}} = \frac{4V_O/\pi}{\pi I_O/2} = \frac{8}{\pi^2} R_O \quad (4)$$

$$Q_{800V} = \frac{1}{(n/2)^2 R_{AC800V}} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \frac{\pi^2}{2n^2 R_O} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (5)$$

$$G_{800V} = \frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{1}{n \sqrt{\left[1 + \frac{1}{k} \left(1 - \left(\frac{f_R}{f_S}\right)^2\right)\right]^2 + \left[Q_{800V} \left(\frac{f_R}{f_S} - \frac{f_S}{f_R}\right)\right]^2}} \quad (6)$$

800V급 배터리 충전 시 제한하는 컨버터의 유효 턴 비는 n 이 되어 400V일 때 보다 출력 전압을 두 배로 증가시킨다. 최대 출력 조건에서 (2)의 Q_{400V} 와 (5)의 Q_{800V} 은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$Q_{400V} = \frac{\pi^2}{8n^2 R_O} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \frac{\pi^2 P_O}{2n^2 (2V_{400V})^2} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (7)$$

$$Q_{800V} = \frac{\pi^2}{2n^2 R_O} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \frac{\pi^2 P_O}{2n^2 (V_{800V})^2} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (8)$$

이때, V_{400V} , V_{800V} 와 P_O 는 각각 400V급 배터리의 출력 전압, 800V급 배터리의 출력 전압 그리고 최대 출력 전력이다.

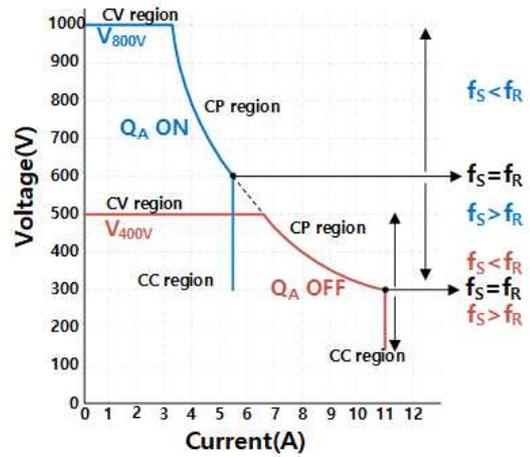


그림 6 배터리 충전 V-I 곡선

표 1 실험에 사용된 소자값 및 세부 사항 및 세부사항

Parameters	Comment	Value
V_{in}	입력 전압	800V
f_s	스위칭 주파수	60~171.5kHz
f_r	공진 주파수	100kHz
L_m	자화 인덕턴스	181uF
L_r	공진 인덕턴스	40.1uF
$C_r/2$ (2EA)	공진 커패시터	28.86nF, 27.86nF
$N_p:N_{SA}:N_{SB}$	변압기 턴 수	4:3:3
V_O	출력 전압	150~1000V

(3)과 (6)에서 제한하는 컨버터의 입출력 전압 변환비 f_S , Q factor와 변압기의 유효 턴 비에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. (7), (8)로부터 $V_{800V}=2V_{400V}$ 일때 Q_{800V} 과 Q_{400V} 이 같으므로 제한하는 컨버터는 동일한 Q factor 범위를 가진다. 따라서 동일한 스위칭 주파수에서 전압 이득은 변압기의 유효 턴비에 의해 결정된다.안하는 컨버터의 Q factor의 범위가 같음을 알 수 있다.유효 턴비가 400V급에서 $2n$, 800V급에서 n 이므로, 제한하는 컨버터는 동일한 스위칭 주파수 범위에서 $G_{800V}=2G_{400V}$ 임을 알 수 있다.

2.3 실험 결과

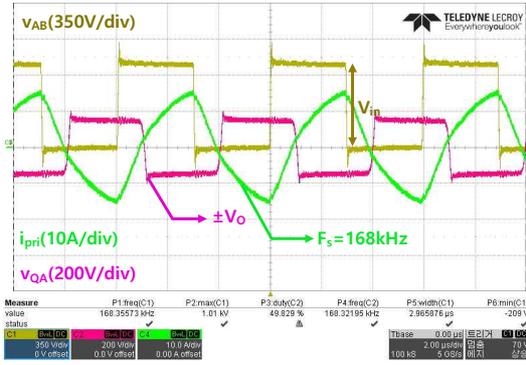
실험을 통해 그림 6의 V-I 곡선을 갖는 컨버터의 설계 타당성을 검증하였다. 이 컨버터는 3.3kW 전기차 충전 모듈의 DC-DC 단에 사용되며 동일한 스위칭 주파수에서 800V급 배터리에서 400V급 배터리의 출력 전압의 2배를 출력 전압으로 갖는 것을 확인하였다. 실험 파라미터와 세부 사항은 표 1과 같다.

2.3.1 400V급 배터리 충전을 위한 병렬 모드 동작

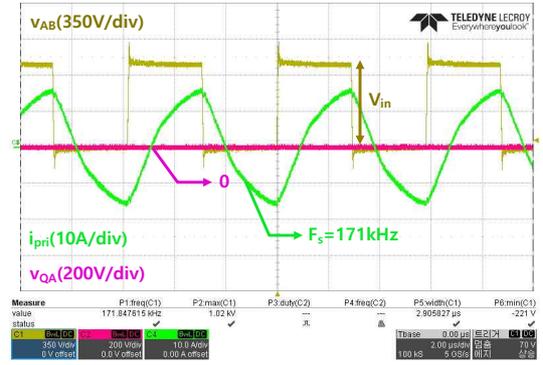
그림 7은 400급 배터리를 충전하기 위해 Q_A 꺼졌을 때 동작점 별 V_{AB} , 1차측 전류(i_{pri}) 그리고 양방향 스위치 양단 전압 파형(v_{QA})이다. Q_A 가 꺼졌고 변압기 2차측 권선은 병렬로 연결되어 Q_A 의 두 단자 전압은 0과 V_O 로 변한다. 따라서 v_{QA} 는 그림7과 같이 $\pm V_O$ 가 변압되어 인가된다.

2.3.2 800V급 배터리 충전을 위한 직렬 모드 동작

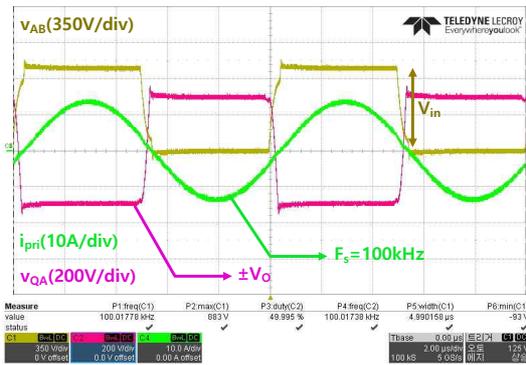
그림 8은 800V급 배터리를 충전하기 위해 Q_A 켜졌을 때 동작점 별 인버터 출력 전압(v_{AB}), 1차측 전류(i_{pri}) 그리고 양방향



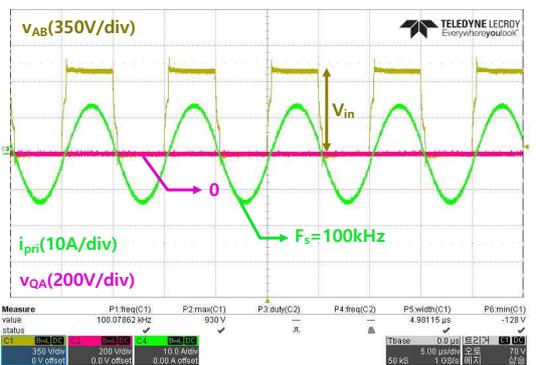
(a) 150V 출력 ($F_s=168\text{kHz}$)



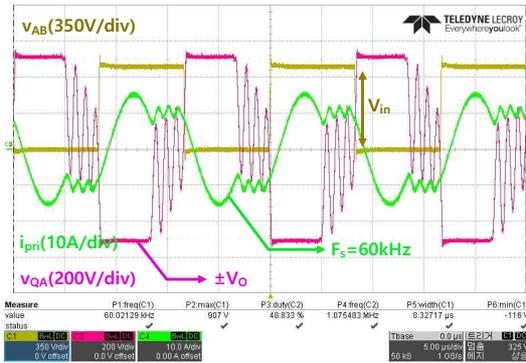
(a) 300V 출력 ($F_s=171\text{kHz}$)



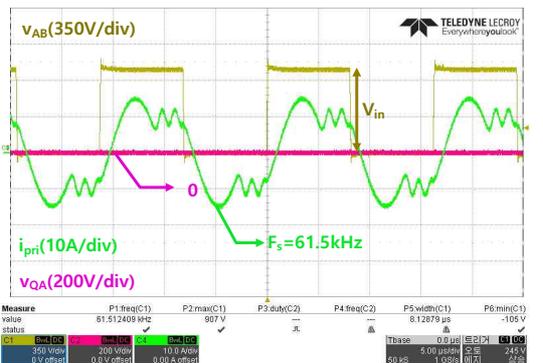
(b) 300V 출력 공진점 동작 ($F_s=100\text{kHz}$)



(b) 600V 출력 공진점 동작 ($F_s=100\text{kHz}$)



(c) 500V 출력 ($F_s=60\text{kHz}$)



(c) 1000V 출력 ($F_s=61.5\text{kHz}$)

그림 7 제안하는 컨버터의 출력 전압 별 주요 동작 파형. 400V 급 배터리를 충전하기 위해 Q_A 는 OFF 상태.

스위치 양단 전압(v_{QA})파형이다. Q_A 가 켜져 있고 변압기 2차측 권선 두 개가 직렬로 연결되어 Q_A 에 걸리는 전압은 항상 0이다.

3. 결론

본 논문에서는 하나의 양방향 스위치를 사용하여 출력 전압 범위를 확장할 수 있는 LLC 컨버터를 제안하였다. 제안하는 컨버터는 양방향 스위치를 꺼서 2차측 정류단을 병렬로 연결하거나 양방향 스위치를 켜서 변압기 2차측 권선을 직렬로 연결하여 출력 전압을 넓힌다. 제안하는 컨버터는 기존 3개의 릴레이를 사용하는 방식에 비해 더 적은 수의 소자로 출력 전압 범위를 두 배로 확장시킬 수 있다.

그림 8 제안하는 컨버터의 출력 전압 별 주요 동작 파형. 800V 급 배터리를 충전하기 위해 Q_A 는 ON 상태.

참고 문헌

- [1] J. Deng, S. Li, S. Hu, C. C. Mi and R. Ma, "Design Methodology of LLC Resonant Converters for Electric Vehicle Battery Chargers," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 4, pp. 1581–1592, May 2014.
- [2] S. Mukherjee, J. M. Ruiz, and P. Barbosa, "A High Power Density Wide Range DC-DC Converter for Universal Electric Vehicle Charging," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 38, no. 2, Feb. 2023.
- [3] S. Mukherjee and P. Barbosa, "Design and Optimization of an Integrated Resonant Inductor With High-Frequency Transformer for Wide Gain Range DC-DC Resonant Converters in Electric Vehicle Charging Applications," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 38, no. 5, May 2023.