

넓은 입력 전압 범위를 갖는 전기자동차 LDC용 2.8 kW 급 Active Clamp Forward 컨버터 최적 설계

이도현¹, 이주아¹, 김채린¹, 김태성², 염상철², 문유진², 강태호², 이병국^{1†}

¹성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과, ²솔루엠

Optimal Design of 2.8 kW Active Clamp Forward Converter for Electric Vehicle LDCs with Wide Input Voltage Range

Do Hyeon Lee¹, Ju-A Lee¹, Chae-Lyn Kim¹, Taisung Kim², Sangcheol Yeom², Yujin Moon², Taeho Kang², Byoung Kuk Lee^{1†}

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, ²Power Conversion Solution G, SOLUM

ABSTRACT

본 논문에서는 넓은 입력 전압 범위를 갖는 2.8 [kW] 급 전기자동차 LDC (Low Voltage DC-DC Converter)용 ACF (Active Clamp Forward) 컨버터의 최적 설계 방안을 제시한다. 스위칭 주파수 및 변압기 턴 비 변화에 따른 ACF 컨버터 회로 구성 파라미터를 설계하여 다양한 설계안을 도출하고, PSIM 시뮬레이션을 통해 성능 검증을 실시한다. 시뮬레이션 결과를 기반으로 각 설계안에 대한 손실을 비교하여 고효율 달성을 위한 최적 설계 파라미터를 선정한다.

1. 서론

최근 전기자동차 사용자의 편의를 위한 차량 내 전자 장비가 다양해짐에 따라 저전압 배터리의 사용량이 증가하여 저전압 배터리 전력 공급을 담당하는 LDC (Low voltage DC-DC Converter)의 출력 용량이 상승하는 추세에 있다. 또한, 전기자동차 성능 향상을 위해 고전압 배터리가 800 [V] 수준으로 상승함에 따라 LDC는 기존 대비 약 2배 정도 더 넓은 입력 전압 범위를 가진다. 이와 같은 기술 동향을 고려하여 LDC는 더 넓은 입·출력 전압 범위 및 다양한 부하 조건에 대해서 고효율 동작 성능 확보를 위한 설계가 요구된다.

그림 1의 ACF (Active Clamp Forward) 컨버터는 ZVS (Zero Voltage Switching) 동작으로 인한 작은 스위칭 손실, 적은 스위치 개수, 경부하 및 중부하에서의 높은 효율 등의 이유로 LDC에 주로 사용된다^[1]. ACF 컨버터는 변압기 턴 비 (n)에 의해 메인 스위치 (S_m)의 듀티 범위가 결정되며, 해당 범위에서 모든 부하 조건에 대해 항상 ZVS 동작을 확보하는 누설 인덕터 (L_r)와 클램프 커패시터 (C_c) 설계가 요구된다. 이러한 설계 파라미터는 스위칭 주파수 (f_{sw})에 따라 달라질 수 있으며, 해당 파라미터가 적용된 경우의 전력 밀도와 효율 간의 trade-off를 고려하여 스위칭 주파수를 선정할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 손실 분석을 기반으로 넓은 입력 전압 범위를 갖는 전기자동차 LDC용 2.8 [kW] 급 ACF 컨버터의 최적 파라미터를 설계한다. 스위칭 주파수 및 변압기 턴 비에 따른 회로 파라미터를 도출하여 다양한 설계안을 제시한다. PSIM 시뮬레이션을 통해 각 설계안에 대한 성능 검증을 실시하고, 시뮬레이션 결과를 기반으로 시스템 정격을 만족하는 전력 반도체 소자 선정과 자성체 및 커패시터 설계를 진행한다. 이후 각 설계안의 실제 하드웨어 구현 상황을 가정한 손실 분석을 실시하여 고효율 동작을 위한 최적 파라미터를 도출한다.

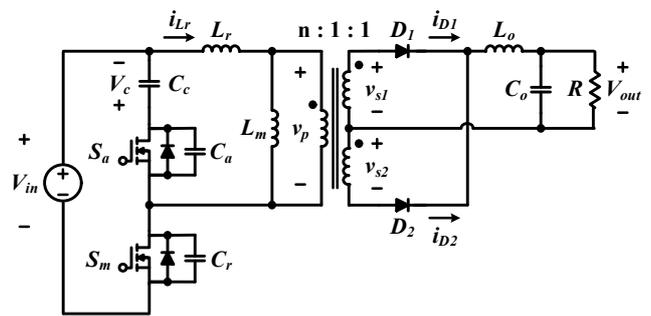


그림 1 ACF 컨버터 회로도

Fig. 1 Circuit diagram of ACF converter.

표 1 ACF 컨버터 설계 사양

Table 1 Design specifications of ACF converter

Parameter [Unit]	Value
입력 전압, V _{in} [V]	320~826
출력 전압, V _{out} [V]	7~16
출력 전력, P _{out} [kW]	2.8
최소 출력 전력, P _{out,min} [kW]	0.8
최대 충전 전류, I _{charging,max} [A]	200
충전 전류 리플, Δi _{charging} [A _{pp}]	5
목표 효율, η _{target}	90%

2. 2.8 kW 급 LDC용 ACF 컨버터 설계 및 검증

2.1 ACF 컨버터 설계 사양 및 설계안 도출 결과

표 1은 전기자동차 LDC용 ACF 컨버터의 설계 조건을 나타낸 것이다. 본 논문에서 설계하는 ACF 컨버터는 800 [V] 급 고전압 배터리를 사용하는 전기자동차에 탑재되는 LDC를 대상으로 설계되므로, 320~826 [V]의 넓은 입력 전압 범위를 갖는다. 또한, 저전압 배터리 사양에 의해 ACF 컨버터는 7~16 [V]의 출력 전압 범위를 가지며, 최대 충전 전류는 200 [A], 충전 전류 리플은 5 [A_{pp}]로 제한된다. 이때 저전압 배터리의 주된 동작 범위는 12.6~15.1 [V]로 특정되므로 이후 진행되는 손실 분석은 해당 범위 내에서만 진행된다.

ACF 컨버터 S_m의 드레인-소스 전압 (V_{ds})은 입력 전압 (V_{in})과 듀티 (D)에 의해 결정되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 S_m에 1.7 [kV] 정격의 SiC MOSFET을 적용하기 위해 safety margin을 고려하여 V_{ds}를 최대 1.3 [kV] 이내로 제한하였다. 따라서 V_{ds}가 최대값을 갖는 최대 입력 전압 조건에서 듀티가 0.36 이내를 만족하는 변압기 턴 비를 선정한다.

표 2 변압기 턴 비 및 스위칭 주파수에 따른 ACF 컨버터 설계안

Table 2 Designs of ACF converters according to turn ratio and switching frequency

Parameter [Unit]	Value															
변압기 턴 비, $N_1 : N_2$	40 : 3 (Case 1)				36 : 3 (Case 2)				30 : 3 (Case 3)				24 : 3 (Case 4)			
스위칭 주파수, f_{sw} [kHz]	50	75	100	125	50	75	100	125	50	75	100	125	50	75	100	125
자화 인덕턴스, L_m [μ H]	382.08				477.6				286.56				343.872			
누설 인덕턴스, L_r [μ H]	42				35				37				32			
클램프 커패시턴스, C_c [nF]	2000	1000	600	400	3300	1400	800	400	5000	2000	1200	800	7000	3300	1800	1000
출력 인덕턴스, L_o [μ H]	3.16	2	1.55	1.3	3.16	2	1.55	1.3	3.16	2	1.55	1.3	3.16	2	1.55	1.3
출력 커패시턴스, C_o [μ F]	980	650	480	390	980	650	480	390	980	650	480	390	980	650	480	390

이때 변압기의 경우 유효 단면적 (A_e)이 597 [mm²]인 PQ65/54 코어를 사용한다고 가정한다. 변압기의 최대 자속 밀도 (B_{max})는 식 (2)와 같고, 이를 통해 자화 인덕턴스 (L_m)를 추정할 수 있다. L_m 에 따라 1차측 전류 기울기가 결정되므로 L_m 의 감소로 전류 기울기가 증가하는 경우, 큰 turn-off 전류로 인해 스위칭 손실이 증가한다. 따라서, 변압기의 창면적 (A_w)을 고려하여 허용 가능한 최대 턴 수가 적용된 L_m 을 도출하였다.

$$V_{ds} = V_{in} + V_{in} \times \frac{D}{1-D} \quad (1)$$

$$B_{max} = \frac{L_m i_{Lm,peak}}{N_1 A_e} \quad (2)$$

다음으로 ACF 컨버터의 ZVS 동작 확보를 위한 L_r 과 C_c 설계를 진행한다. ZVS 동작 확보를 위해서는 S_m 이 off 되어 있는 구간의 전류 path를 고려해야 한다. 해당 구간 동안 공진에 의해 기생 커패시터 (C_r)가 모두 방전되고, S_m 의 역방향 다이오드를 통해 L_r 의 잔여 에너지에 의한 전류가 도통되는 경우에만 S_m 의 ZVS turn-on 동작이 가능하다. 이러한 동작을 만족하기 위해서는 역방향 다이오드 전류 도통 시점 (T_a)에서 L_r 에 저장된 에너지가 C_r 에 저장된 에너지보다 커야 하므로, 식 (3)을 만족하는 L_r 를 도출할 수 있다.

$$\frac{1}{2} L_r (i_{Lr}(t = T_a))^2 > \frac{1}{2} C_r (V_{in,max})^2 \quad (3)$$

L_m 의 에너지 방출 시간은 L_m , L_r 및 C_c 간의 공진 주기에 의해 결정된다. 공진 주기가 짧을 경우, S_m 의 off 시간 동안 공진 전류 (i_{Lr})가 방전과 충전이 반복되면서 i_{Lr} 이 양의 값을 갖는 구간이 발생한다. 만약 i_{Lr} 이 양의 값을 갖는 구간에서 S_m 이 turn-on 되면 하드 스위칭에 의해 스위칭 손실이 증가한다. 그러므로 S_m 의 off 구간 동안 i_{Lr} 이 방전 동작을 유지할 수 있도록 식 (4)와 같이 공진 주기를 S_m 의 off 시간의 15배 이상으로 설계하였다. 그러나 이를 만족하더라도, C_c 가 충분히 크지 않을 경우 공진에 의해 클램프 커패시터 전압 (V_c)이 상승하는 정도가 증가한다. 따라서 KVL (Kirchhoff's Voltage Law)에 의해 V_{ds} 의 최대값 또한 상승하여 V_{ds} 의 최대 전압 조건을 초과할 수 있다. 따라서 ZVS 동작 확보를 위한 최소 공진 주기와 최대 V_{ds} 조건을 고려하여 최적의 C_c 를 선정하였다.

$$2\pi \sqrt{(L_r + L_m)C_c} \geq 15(1-D)T \quad (4)$$

마지막으로 출력 인덕터 (L_o)는 전류 리플이 최대 충전 전류의 25% 이내가 되도록 설계하였으며, 출력 커패시터 (C_o)는 출력 전압 리플이 출력 전압의 1% 이내가 되도록 설계하였다. 표 2는 앞서 언급한 설계 조건을 모두 만족하는 회로 구성 파라미터를 도출한 결과이다. 변압기 턴 비에 따라 설계 case를 4가지로 구분하였으며, 하나의 case 내에서 스위칭 주파수를 50~125 [kHz]로 설정하여 각 회로 파라미터를 도출하였다.

2.2 ACF 컨버터 시뮬레이션 검증

그림 2는 여러 설계안을 대표하여 case 1의 스위칭 주파수 100 [kHz] 조건에서 PSIM 시뮬레이션을 진행한 결과이다. 이때, 320 [V], 820 [V]의 입력 전압에 대해서 7 [V], 1.4 [kW] 출력 조건과 14 [V], 2.8 [kW] 출력 조건으로 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 2의 V_{ds} 및 i_{Lr} 파형을 통해 모든 조건에서의 ZVS 동작을 확인할 수 있다. 또한, V_{ds} 최대 전압은 약 1.1 [kV]로 safety margin을 고려하여 1.7 [kV]의 전력 반도체 소자의 적용이 가능함을 확인할 수 있다. 위와 같은 과정으로 모든 설계안에 대해서 시뮬레이션을 진행하였으며, 입·출력 전압 및 부하 조건에 관계없이 항상 설계 조건을 만족함을 확인하였다.

3. 설계안에 따른 손실 분석 결과

다양한 설계안의 전체 손실을 정량적으로 비교 분석하기 위해 시스템 정격을 고려하여 표 3과 같은 하드웨어 구현 상황을 가정한다. 자성체의 경우 손실 분석의 용이성을 위하여 코어 사이즈를 하나로 고정하였으나, 이후 하드웨어 구현 시에는 전력 밀도를 고려하여 코어 사이즈를 최소화할 필요가 있다. 또한, 2차측 다이오드의 경우 D_2 의 역방향 전압 및 도통 전류가 D_1 에 비해 더 높게 형성됨에 따라 서로 다른 정격의 소자를 선정하였다. 스위치의 경우 각 설계안에서 측정된 최대 V_{ds} 를 기준으로 1.2 [kV] 및 1.7 [kV] 전압 정격의 소자를 선택 적용하였다. V_{ds} 가 1 [kV] 이내일 경우 1.2 [kV] 전압 정격의 소자를 적용하였으며, 이는 설계 case 3, 4의 50 [kHz] 조건에 해당한다. 또한, C_c 및 C_o 의 ESR에 의한 손실은 매우 작아 손실 분석 대상에서 제외하였다.

표 4는 본 논문에서 수행한 손실 분석 결과를 나타낸다. 이때 동일 출력 전압 조건에서 부하 변동에 따른 손실 차이는 미미하여 최대 부하 조건에 대한 손실 분석 결과만을 나타내었다.

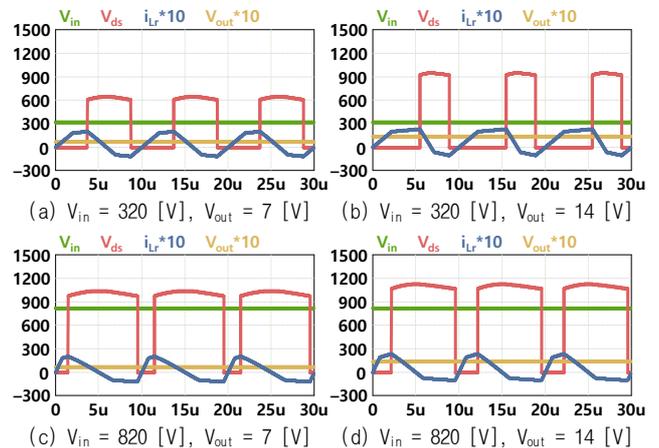


그림 2 Case 1 100 [kHz] 조건 설계안 적용 ACF 컨버터 시뮬레이션 결과
Fig. 2 Simulation results of ACF converter with design under the condition of case 1 100 [kHz].

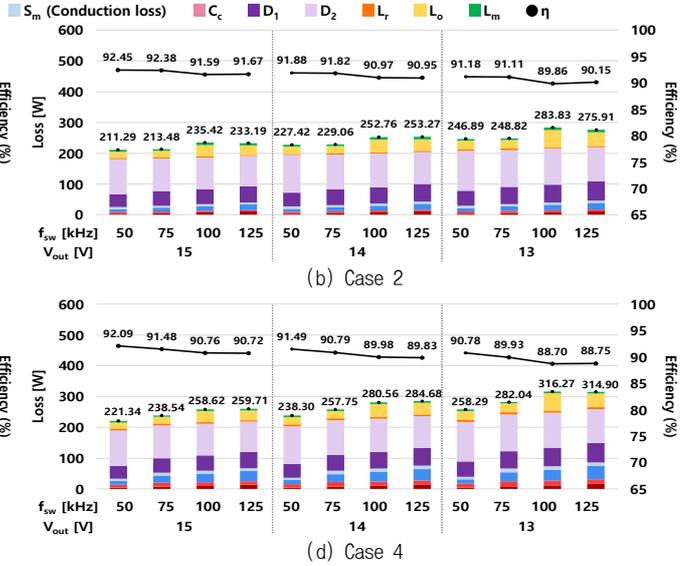
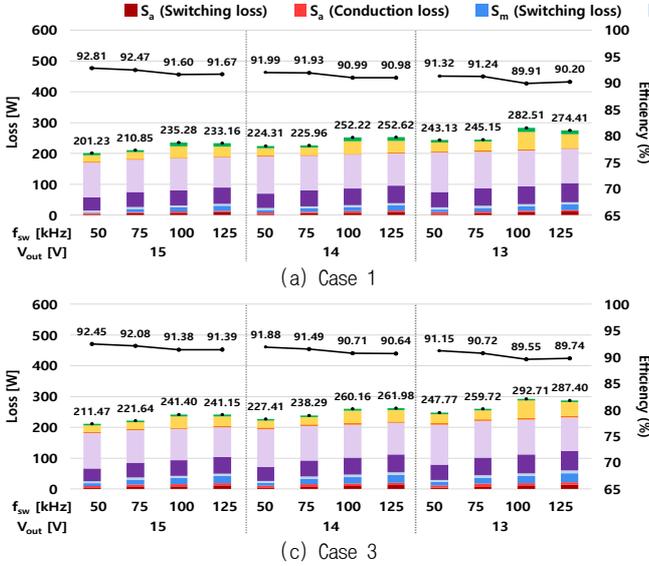


그림 3 600 [V] 입력 전압 조건 설계 case에 따른 ACF 컨버터 손실 및 효율 비교 결과

Fig. 3 Comparison of losses and efficiencies of ACF converter according to design case under the condition of 600 [V] input voltage.

표 3 하드웨어 구현을 위한 소자 선정

Table 3 Device selection for hardware fabrication

Element	Manufacturer	Device
변압기	PC95 PQ65/54	
인덕터 L_r, L_o	PC95 PQ50/50	
다이오드 D_1	STMicroelectronics社	STPS200170TV1Y
다이오드 D_2	STMicroelectronics社	STTH16003TV1
스위치 ≤ 1 [kV]	Toshiba社	TW045Z120C
$S_m, S_a > 1$ [kV]	STMicroelectronics社	SCT20N170AG

표 4 손실 분석 조건

Table 4 Conditions for loss analysis

Parameter [Unit]	Value
입력 전압, V_{in} [V]	450, 600, 800
출력 전압, V_{out} [V]	13, 14, 15
출력 전력, P_{out} [kW]	2.8
스위칭 주파수, f_{sw} [kHz]	50, 75, 100, 125

그림 3은 입력 전압 600 [V] 조건에서 스위칭 주파수 및 출력 전압에 따른 효율 및 손실을 나타낸다. 이를 통해 모든 설계안에서 스위칭 주파수가 증가할수록 높은 스위칭 손실로 인해 효율이 저하되는 양상을 보임을 알 수 있다. 또한, case 1에서 case 4로 갈수록 변압기 턴 수 감소로 L_m 이 감소함에 따라 높은 turn-off 전류에 의한 스위칭 손실 증가로 효율이 저하되는 양상을 보인다. 본 논문에서 제시한 목표 효율 90%를 달성하지 못하는 case 1, 2의 100 [kHz] 조건과 case 3, 4의 100, 125 [kHz] 조건을 제외하면 case 1의 50 [kHz] 조건에서 효율이 가장 우수함을 확인할 수 있다. 하지만 해당 조건은 낮은 스위칭 주파수로 인해 전력 밀도 측면에서 불리한 특성을 가지며, 고전력 밀도 달성에 가장 유리한 설계안은 case 2의 125 [kHz] 조건이다. 따라서 두 조건에 대해서 그림 4와 같이 추가적인 손실 분석을 진행하였다. 이를 통해 모든 동작 조건에서 case 1의 50 [kHz] 조건을 적용했을 때 효율이 우수하나, case 2의 125 [kHz] 조건과의 효율 차이는 최대 1.17%, 최소 0.87%로 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 또한, case 2의 125 [kHz] 조건은 case 1의 50 [kHz] 조건 대비 L_m 10% 감소, L_r 24% 감소, C_c 80% 감소가 가능하므로 전력 밀도 측면에서 유리함을 갖는다. 따라서 효율과 전력 밀도 간의 trade-off를 고려하여 case 2의 125 [kHz] 조건을 최적 설계안으로 선정하였다.

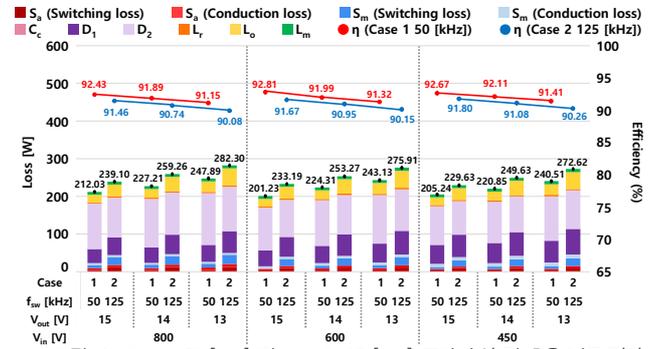


그림 4 Case 1 50 [kHz] 및 case 2 125 [kHz] 조건 손실 및 효율 비교 결과

Fig. 4 Comparison of losses and efficiencies of design case 1 50 [kHz] and case 2 125 [kHz].

4. 결론

본 논문에서는 800 [V] 급 고전압 배터리를 사용하는 전기차 동차 LDC용 2.8 [kW] 급 ACF 컨버터의 최적 설계안을 제시하였다. ACF 컨버터의 설계 조건에 따른 파라미터 제한 조건을 확인하고, 변압기 턴 비 및 스위칭 주파수에 따라 회로 파라미터를 도출하였다. 각 설계안에 대한 PSIM 시뮬레이션을 통해 설계 조건 만족 여부를 확인하였으며, 손실 분석 결과를 기반으로 효율 및 전력 밀도를 고려한 최적 설계안을 도출하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022400000440, 섹터커플링 에너지산업 고도화 인력양성사업)

참고 문헌

[1] Bor-Ren Lin, Kevin Huang and David Wang, "Analysis, design, and implementation of an active clamp forward converter with synchronous rectifier," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 53, no. 6, pp. 1310-1319, June 2006.