

넓은 입력전압 범위를 갖는 LDC에 적합한 토폴로지 비교 분석

정택근, 김철민, 김종수[†]
 대진대학교 전기공학과

Comparative Analysis of Topologies Suitable for LDC with Wide Input Voltage Range

Taek-Keun Jung, Chul-Min Kim, Jong-Soo Kim[†]
 Department of Electrical Engineering, Daejin University

ABSTRACT

Abstract - 본 논문에서는 넓은 입력전압 범위에 대응 가능한 LDC 토폴로지에 대해 분석한다. 2.5kW급 Wide input LDC에 적용 가능한 토폴로지의 특징 및 장·단점을 분석하고, 각 토폴로지 별 시스템 손실을 정밀 분석 및 효율 예측을 통해 검증한다. 손실은 수식을 통해 분석했고, 토폴로지 별 2.5kW 수준의 시뮬레이션을 통해 동작 타당성을 확인했다. 손실 분석은 PSFB 컨버터와 ACF 컨버터로 진행했고, 전 부하 조건에서 ACF converter의 손실이 약 20W 정도 높았다.

1. 서론

최근 차량용 전장부품의 전력수요가 증가하면서 이에 대응하기 위해 LDC(Low voltage DC-DC Converter, 저전압 전력 변환 장치) 전원 용량 증대에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 LDC의 설계 시 주요 파라미터 중 하나인 입력전압은 차량의 종류 및 적용된 배터리 사양에 따라 상이한 특징을 지닌다. 현재 상용화되어있는 LDC 제품군의 경우 각각의 차종마다 다른 사양의 LDC를 적용하고 있으며 이는 연구개발 및 관리 비용면에서 단점을 갖는다. 따라서, 차종별 요구용량을 만족시킬 수 있도록 넓은 입력전압 범위(400V, 800V)에 대응 가능한 승용 및 상용차의 전력변환 공용화 연구가 필요하다.

본 논문은 차량용 고전압 배터리 400V급, 800V급 모두 유연한 대응이 가능한 LDC 토폴로지를 연구하고, 시뮬레이션 및 손실 분석을 통해 2.5kW급 Wide input LDC에 적합한 토폴로지를 선정한다.

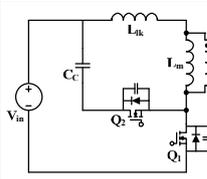
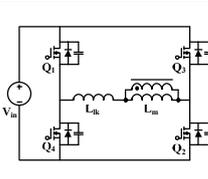
2. Wide input에 대응 가능한 Topology

2.1 Active Clamp Forward converter

ACF(Active Clamp Forward) 컨버터는 넓은 전압전달비, 1차 측 switch ZVS 동작, 작은 출력 필터로 2.5kW Wide input LDC에 적용할 수 있는 토폴로지이다. 1차 측 스위치를 2개만 사용하여 증부하 영역에서 다른 Full Bridge 형태의 토폴로지보다 적은 손실을 기대할 수 있으며, Conventional Forward 컨버터와 달리 누설 인덕턴스에 저장되어있는 에너지를 재사용하여 높은 효율을 달성할 수 있다. 하지만 토폴로지 특성상 1차 측 main switch의 전압 스트레스가 증가하므로 Wide input 시스템 적용 시 높은 내압의 switch 사용이 강제되어 시스템 단가가 높아지는 단점이 존재한다.^[1]

표 1 토폴로지별 특징 비교

Table 1 Comparison of features by topology

Topology	ACF	PSFB
Structure		
SW device	2	4
SW stress	Vin+Vclamp	Vin
Output control	Duty-cycle	Phase-Shift
Characteristics	Recycling Circulating current	No additional Resonant component

2.2 Phase-Shift Full-Bridge converter

PSFB(Phase-Shift Full-Bridge) 컨버터는 LDC에 적용되는 다른 토폴로지(대표적으로 ACF)와 마찬가지로 넓은 전압전달비를 가지고 있어 넓은 입력전압 범위에서도 적용할 수 있으며, 설계된 경부하 조건 내에서는 ZVS 동작이 가능하다. 또한, 추가적인 공진 요소 없이 변압기 내의 기생 인덕턴스 성분과 스위치의 기생 커패시턴스(Coss)를 이용하여 ZVS를 달성하므로 다른 공진형 컨버터에 비해 전력 밀도 측면에서 우수하다. Wide input 시스템 특성상 높은 입력전압에 의해 발생하는 1차 측 switch의 전압 스트레스 문제를 해결해야 하는데, PSFB는 Full-Bridge 형태가 강제되므로 switch 전압 스트레스가 ACF 컨버터에 비해 유리하다는 장점이 있다.

PSFB 컨버터는 Wide input 시스템에 적용할 때 높은 입력 전압 조건에서 무효 듀티 구간이 증가하여 순환전류가 증가하므로 도통 손실이 커지게 된다. 하지만 높은 입력전압 조건의 경우 1차 측에는 낮은 전류가 흐르게 되므로 순환전류에 의한 도통 손실은 1차 측 전압과 전류의 Trade-Off로 인해 치명적인 문제를 초래하지 않는다.

3. 시스템 설계 및 시뮬레이션

3.1 Wide input 2.5kW급 LDC Topology 별 사양

2.5kW급 Wide input 시스템에 적합한 토폴로지를 선정하기 위해 ACF 컨버터, PSFB 컨버터의 시스템 설계 및 손실 분석을 진행해야 한다. LDC는 2차 측에 대전류가 흐르므로 정류단 도통 손실을 최소화하기 위해 SR(Synchronous Rectifier) 및

표 2 설계 사양

Table 2 Design specifications

Topology	PSFB	ACF
Vin[V]	288~830	
Vout[V]	12.8~15.3(Vnom=13.9V)	
Pout[W]	2500	
fs[kHz]	200	
Np : Ns	14 : 1	13 : 1
Lm	74.4u	28.7u
Llk	4u	0.469u
Switch	SCT4062KWAHRTL	G3R45MT17K

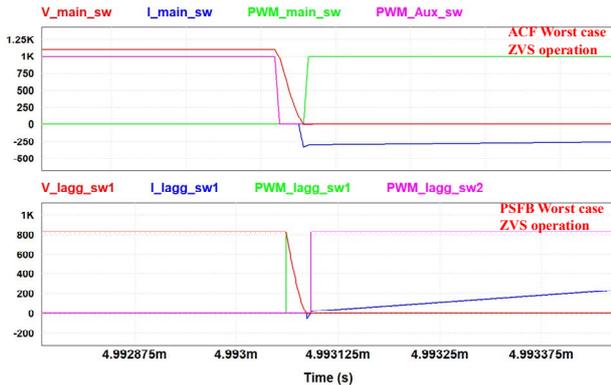


그림1 ZVS 동작(Worst case)

Fig.1 ZVS Operation (Worst case)

Switching device가 2개 들어가는 정류회로로 선정하고, 입력 전압 사양은 400V급, 800V급 모두 대응이 가능해야 하므로 넓은 입력전압 조건에서 설계를 진행했고, 표 2와 같다.

3.2 시뮬레이션

그림 1은 토폴로지 별 Worst case에서 ZVS(Zero Voltage Switching) 동작을 확인하고, 설계의 타당성을 검증하였다. 각 토폴로지의 Worst case는 PSFB 컨버터의 경우 경부하 조건(자화전류, 부하전류 최소)이고, ACF 컨버터는 자화전류 최소, 부하전류 최대 조건이다.

4. 손실 분석

2.5kW급 Wide input LDC에 적합한 토폴로지 선정에 근거를 제시하기 위해 토폴로지 별 손실 분석을 진행했다. 일반적으로 전기자동차 전장 부하는 출력전류 20A 이상의 부하 영역에서 동작하므로 30%~100% 부하 조건에서 손실을 분석했으며, 이때 Battery Load Profile의 CV(Constant Voltage)-mode로 진행했다.^[1]

그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 Switching Loss, SR Loss, Wire Loss는 ACF 컨버터가 크게 나타났으며, Core Loss는 PSFB 컨버터가 크게 나타났다.

ACF 컨버터는 일반적으로 변압기의 기생 인덕턴스 성분 및 자화전류로 ZVS 동작을 수행하므로 1차 측에 상대적으로 많은 전류가 흐르게 되므로 Switch, Wire의 conduction Loss가 높게 나타난다. 분석한 30%~100% 부하 영역 모두 ACF 컨버터의 손실이 PSFB 컨버터보다 약 20W 이상 높은 손실을 확인하였다. 손실 분석은 수식을 통하여 각 주요 부 소자들의 손실을 비교했으며, 그 식은 다음과 같다.^[2] :

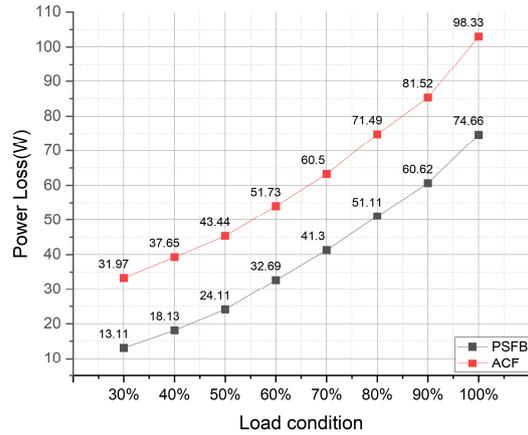


그림2 전 부하 손실 비교(Vo = 15.3V)

Fig.2 Comparison of Total Load Losses (Vo = 15.3V)

$$P_{SW} = P_{sw,con} + P_{sw,diode} + P_{sw,turnoff} + P_{sw,driving} \quad (1)$$

$$P_{SR} = P_{sr,con} + P_{sr,switching} + P_{sr,driving} \quad (2)$$

$$P_{TR,core} = P_{cv} \times V_e \quad (3)$$

$$P_{TR,wire} = P_{pri,dc} + P_{sec,dc} \quad (4)$$

변압기 Core Loss는 주파수 조건마다 ΔB 에 따른 P_{cv} 를 측정 한 $P_{cv} - \Delta B$ 곡선을 이용하였고, 변압기 Wire Loss는 Litz wire를 사용하여 교류 저항에 의한 손실은 1% 미만으로 무시할 수준이므로 손실 계산에서 제외하고, 직류 저항에 의한 권선 손실만 고려하였다.^[2]

5. 결론

본 논문에서는 2.5kW 넓은 입력전압 범위를 갖는 LDC에 적합한 토폴로지에 대한 손실 분석 및 최적 토폴로지 선정을 진행했다. 모든 부하 영역에서 PSFB 구조에서 0.8%(약 20W) 정도 높은 효율을 확인했다. 토폴로지 특성 및 손실 분석을 진행한 결과 ACF 컨버터는 손실은 크지만 적용되는 소자의 개수가 적고, PSFB 컨버터는 소자의 개수는 많지만, 효율이 상대적으로 높았다. 위 결과를 기반으로 LDC 토폴로지를 결정할 때 적용되는 시스템의 달성 목표에 초점을 맞춰 선택적으로 토폴로지 선정을 할 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문에서 분석한 결과를 토대로 추후 차종별 전력수요 대응이 가능한 Module type의 PSFB LDC Hardware를 제작하고, 직·병렬 구조로 확장하여 10kW급 LDC에 대응하기 위한 연구를 진행할 계획이다.

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(K_G012002434801)

참고 문헌

- [1] 윤한신. "하이브리드 및 전기자동차 등 환경차 전장 부하용 LDC 시스템의 기술 동향." 전력전자학회지 25.2 (2020): 32-36.
- [2] 김종수. "전기자동차용 탑재형 충전기의 공진 network 최적 설계에 관한 연구." 국내박사학위논문 성균관대학교 일반대학원, 2011. 서울