

UAM용 50kW, 100kHz, 99.4% 소프트 스위칭 부스트 컨버터 개발

김덕호, 조범수, 이동한, 최세완[†]
 서울과학기술대학교

Development of 50kW, 100kHz, 99.4% Soft-Switching Boost Converter for UAM

Deokho Kim, Bumssoo Jo, Donghan Lee, Sewan Choi[†]
 Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 수소연료전지용 UAM(Urban Air Mobility) 응용에 적합한 고승압, 고효율 50kW FDC(Fuel Cell DC-DC Converter)를 제안한다. 제안하는 FDC는 일반 부스트 컨버터 대비 고승압 동작이 가능한 고승압 부스트 컨버터^[1]회로를 적용하였다. UAM에 탑재되는 제안하는 FDC 모듈은 무게를 저감하기 위해 고주파 동작이 가능한 보조회로를 적용하였고 대전류를 분담하기 위해 4상 인터리빙 구조로 설계되었다. 본 논문에서는 부스트 컨버터 소프트 스위칭 방식을 비교 분석하였고 최대 50kW 용량의 FDC 시작품을 제작하여 성능을 검증하였으며 최대 효율 99.46%을 달성하였다.

1. 서론

도심 항공 교통(UAM)은 도시를 저고도로 비행하여 승객과 화물을 운송하는 차세대 교통체계로, 항속 거리를 향상시키기 위해 리튬-폴리머나 리튬-이온 배터리보다 에너지 밀도가 높은 수소연료전지를 사용한다. UAM의 상용화를 위해서는 경량화와 가격 저감이 필요하며, 이를 위해 고승압 FDC 적용이 필수적이다. 현재 상용화된 FDC는 주로 부스트 컨버터를 사용하지만, 이는 최대 3~4배 승압에 한계가 있다. 고승압 부스트 컨버터는 5~6배 승압비를 제공하여 연료전지 셀 적층 수를 감소시킬 수 있어 가격과 무게를 저감시킬 수 있다. FDC의 경량화를 위해서는 스위칭 주파수를 증가시켜 수동소자 무게를 줄이는 방식을 검토할 수 있다. 그러나 기존의 부스트 컨버터는 메인 스위치가 하드스위칭으로 동작하기 때문에 스위칭 주파수 증가에 한계가 있다. 따라서 소프트 스위칭이 가능한 방식이 필요하다. 부스트 컨버터의 소프트 스위칭 동작을 위한 방안으로 TCM과 제안하는 방식이 검토될 수 있다. 본 논문에서는 부스트 컨버터와 소프트 스위칭 방식을 비교하여 주어진 사양에 적합한 회로를 제안한다.

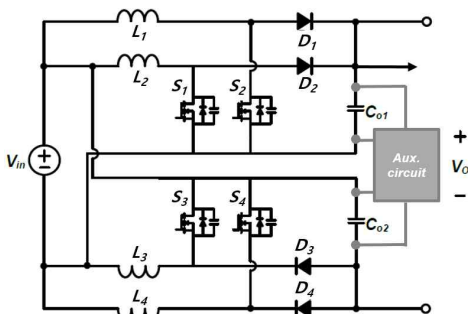


그림 1. 보조회로가 적용된 고승압 부스트 컨버터

Comparison	CCM	TCM ^[2]	제안하는 보조회로 ^[3]
추가회로 필요성	불필요	불필요	필요
메인 스위칭 특성	Hard switching on Hard switching off	Soft switching on Hard switching off	Soft switching on Hard switching off
인덕터 전류			
turn-off 전류	77.7A	107A	58.7A
스위칭 주파수 가변	고정	가변	고정
동기 정류 사용 여부	미사용	사용	미사용

표 1. CCM, TCM, 제안하는 보조회로 특성 비교

2. 소프트 스위칭 방식 비교

표 1은 CCM으로 동작하는 부스트 컨버터와 소프트 스위칭을 달성하기 위한 2가지 방안에 대한 특성 비교이다. TCM^[2]은 필터 인덕터의 음전류 에너지를 이용하여 메인 스위치의 소프트 스위칭을 성취할 수 있다. 하지만 여전히 스위치가 하드스위칭턴 오프를 하기 때문에 큰 인덕터 전류의 리플로 인하여 스위치의 Turn-off 손실이 크고, 수동소자의 요구되는 에너지량이 증가한다. 또한 부하별 스위칭 주파수의 가변으로 인해 수동소자의 부피 저감에 한계가 있다. 제안하는 보조회로는 간단한 회로를 추가하여 부스트 컨버터의 소프트 스위칭이 가능할 뿐만 아니라 인덕터 전류 리플을 작게 설계하여 높은 효율을 달성하기에 적합하다. 또한 고정 주파수로 동작하기 때문에 설계가 간단하고 수동소자의 최적 설계가 가능하다. 제안하는 보조회로가 적용된 FDC는 그림 1과 같다. 그림 2는 주어진 사양에 따라 컨버터 별 성능 비교를 보여준다. TCM은 CCM 컨버터

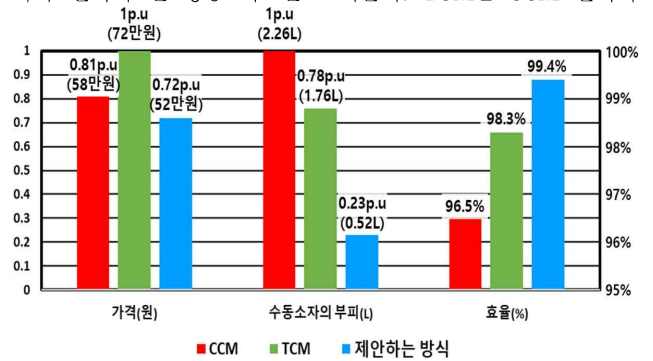


그림 2. 컨버터 별 성능 비교
 (@ $P_o = 50kW, V_{in} = 150V, V_o = 600V$)

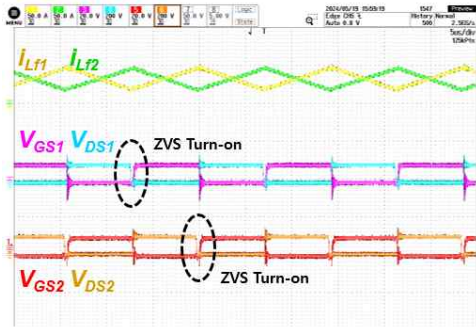


그림 3. 제안하는 FDC 동작 파형

대비 수동소자의 부피와 효율이 다소 향상되었지만 높은 전류 리플로 인해 높은 스위칭 주파수를 사용하는 것이 제한된다. 또한 동기 정류를 사용해야하므로 가격이 타 비교군에 비해 다소 상승하는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 보조회로를 적용하는 경우 추가 회로가 필요하지만 추가 회로의 가격 증가 대비 수동소자의 부피 감소에 의한 가격 감소량이 크기 때문에 전체 시스템의 가격은 TCM 방식에 비해 28% 낮은 것을 확인할 수 있으며 효율 또한 TCM 대비 1.1% 증가한다. 계산 효율은 정격 동작을 기준으로 진행되었으며 주어진 사양의 경우 저전압 대전류 입력 특성으로 인해 제안하는 보조회로의 특성이 적합한 것으로 분석된다.

3. 제안하는 FDC 실험결과 및 분석

본 논문에서 제안하는 보조회로를 추가한 FDC의 동작 및 타당성을 검증하기 위해 아래 설계사양에 따라 실험을 진행했다.

- $V_{in} = 125V \sim 220V$ • $V_{out} = 450V \sim 600V$
- $P_o = 50kw$ • $I_{in(max)} = 333A$

주어진 사양에 따라 선정된 주요 소자는 아래와 같다.

- MOSFET : IMZA65R015M2H (Infineon)
- Diode : IDW40G65C5 (Infineon)
- Filter Inductor : CH610026 (Changsung)
- Output Capacitor : C4AQIEW6180M3AK (KEMET)

그림 3은 제안하는 FDC의 정상상태 동작 파형이다. 필터 인덕

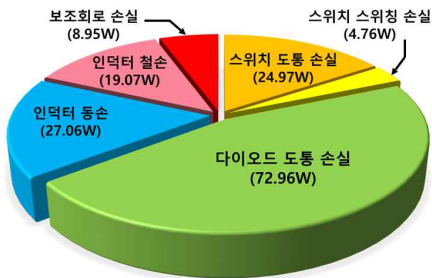


그림 4. 제안하는 FDC 손실분석 (@25kW, $V_{in} = 220V$, $V_o = 600V$)



그림 5. 제안하는 FDC의 측정 효율 (Yokogawa WT3000)



그림 6. 정격 동작 온도 측정 (@ $T_{coolant} = 65^\circ C$)

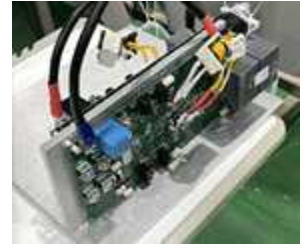


그림 7. 제안하는 FDC 시작품

터 전류와 스위치의 게이트-소스, 드레인-소스 전압 파형이 포함되며 스위치가 ZVS Turn-on을 성취하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4와 그림 5는 2상 기준 25kW 사양의 손실 분석과 측정 효율을 보여준다. 다이오드의 도통손실이 대부분을 차지하며, 제안하는 보조회로의 적용으로 인해 고주파 동작에도 스위칭 손실이 적은 것을 알 수 있다. 큰 입력 전류로 인해 스위치의 도통손실과 인덕터의 동손이 주요하며, 보조회로 추가에 의한 손실 상승량은 매우 적다. 그림 6은 Coolant의 온도를 65도로 설정하여 정격 용량인 50kW 동작 시 온도를 보여준다. 가장 높은 발열이 측정되는 소자는 스위치며 최대 117°C로 측정되었다. 그림 7은 수냉 냉각방식을 적용한 FDC 시작품이다.

4. 결론

본 논문에서는 수소연료전지 기반 UAM에 적합한 50kW 고승압, 고효율 FDC를 제안한다. FDC는 고승압 부스트 컨버터와 소프트 스위칭을 위한 보조회로를 적용하여 시작품의 성능을 검증하였다. 333A의 대전류 분담을 위해 4상 인터리빙 구조로 설계되었으며 제작된 FDC 시작품은 최대 효율 99.46%를 달성하였다.

이 논문은 Infineon의 전력반도체 지원을 받아 수행된 연구임. 본 과제(결과물)은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구 결과입니다.

참고 문헌

- [1] S. Choi, V. G. Agelidis, J. Yang, D. Coutellier, and P. Marabeas, "Analysis, design and experimental results of a floating-output interleaved input boost-derived DC-DC high-gain transformer-less converter," IET Power Electron., vol. 4, no. 1, pp. 168 - 180, Jan. 2011
- [2] Z. Hou, D. Jiao, B. C. Gutierrez, J. -S. Lai and P. -L. Chen, "Design of a 15kW High-Efficiency and High Power Density Bidirectional TCM Buck/Boost Converter," 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, USA, 2024, pp. 341-347,
- [3] B. Akhlaghi and H. Farzanehfar, "Family of ZVT Interleaved Converters With Low Number of Components," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 11, pp. 8565-8573,