

120kW급 선박용 연료전지 시스템을 위한 고효율 모듈형 전력변환기 개발

박혜령¹⁾, 오정배¹⁾, 허 환¹⁾, 권민호²⁾, 이종필²⁾

¹⁾범한산업, ²⁾한국전기연구원

Development of 120kW high efficiency modular power converter for ship fuel cell system

Hye-Ryoung Park¹⁾, Jung-Bae Oh¹⁾, Hwan Huh¹⁾, Min-Ho Kwon²⁾, Jong-Pil Lee²⁾

¹⁾Bumhan Industry, ²⁾KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)

ABSTRACT

본 논문은 120kW급 선박용 연료전지 시스템을 위한 고효율 모듈형 전력변환기의 설계 및 구현에 대한 것이다.

2상 인터리브드 부스트 컨버터와 공진형 컨버터(SRC)의 2단 변환 구조로 구성된 30kW급 단위 모듈 4개를 병렬 운전하여 120kW 컨버터 유닛을 제작하였다. 120kW 컨버터 유닛 기준 총 8상 인터리브드 부스트 컨버터로 동작하여 전류 리플을 감소시켰으며, 최고 효율 97.95%를 달성하였다.

최종 목표는 120kW 컨버터 유닛을 병렬 운전하여 메가와트(MW)급의 선박용 전력변환기를 제작하는 것이다. 이를 위해 2개의 60kW 컨버터 유닛에 Droop 제어를 적용하여 병렬운전 제어 기능을 검증하였다.

1. 서론

세계적으로 대기 오염 문제가 심각해지면서, 환경 문제에 대한 인식과 대책이 요구되고 있다. 선박 분야에서도 친환경 기술의 개발과 적용이 중요시되고 있으며 그 중, 발전효율이 높고 소음 및 진동이 거의 없는 연료전지가 선박용 동력원으로 주목받고 있다. 연료전지의 낮은 전압, 넓은 변동 범위, 대전류 특성으로 인해, 선박용 전원으로 사용하기 위해서는 승압 및 고효율 전력변환기를 반드시 제작해야 한다.

본 논문에서는 120kW급 선박용 연료전지 시스템을 위한 전력변환기를 설계하고자 한다. 이를 위해 스위칭 소자 및 변압기 제작을 고려하여 단위 모듈 용량을 30kW로 모듈화하였으며, 100kW급 연료전지의 단위용량에 따라 입력전압 240~480V, 출력전압 1,100V인 120kW 컨버터를 한 유닛으로 선정하였고, 해당 유닛은 30kW 단위 모듈 4 병렬로 구성하였다.

120kW 컨버터 유닛으로 선박용 MW급의 출력을 내기 위해서는 각 컨버터 유닛 간의 병렬운전이 불가피하다. 병렬운전 방식에는 통신을 이용하여 상호 간 전력을 분담하는 방법이 있으나 높은 대역폭으로 많은 컨버터를 통신하며 통제하는 것은 경제적인 부담이 따르고 통신의 신뢰성 확보도 필요하다. 통신 없이 부하를 분담하는 방법으로 널리 알려진 Droop 제어 방식은 직접 전압제어 기반이기 때문에 부하분담 성능이 좋지만, 부하에 따른 전압변동이 발생하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 Droop 제어 방식을 기반으로 빠른 응답 특성을 확보하고 낮은 대역폭의 통신방식으로 전압변동을 보상하는 Secondary 제어 방식을 적용하였다. Droop 제어와 secondary 제어 방식을 적용한 병렬운전 성능을 검증하기 위해, 120kW 컨버터 유닛을 2개의 60kW 컨버터 유닛으로 제작하여 부하분담 성능을 검증

하였다.

2. 120kW 컨버터 유닛

2.1 제안 회로

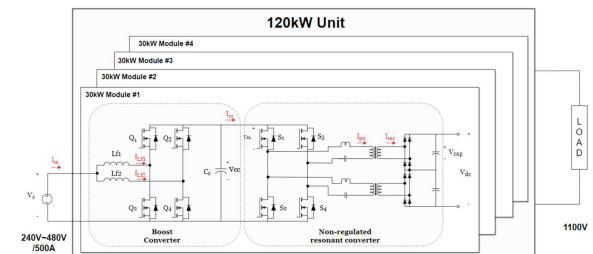


그림 1 120kW 컨버터 유닛 토폴로지 구조

Fig. 1 120kW Converter Unit Topology Structure

그림 1은 120kW 컨버터 유닛의 토폴로지이다. 각 30kW 단위 모듈은 2상 인터리브드 부스트 컨버터와 SRC의 2단 변환 구조이며, 240~480V의 입력전압을 부스트컨버터를 통해 550V로 승압하고, 병렬 연결된 2개의 1:1 변압기를 이용한 SRC 출력을 직렬 연결하여 1,100V의 출력을 내는 토폴로지이다.^[1]

2.2 시뮬레이션 결과

2.2.1 8상 인터리브드 부스트 컨버터

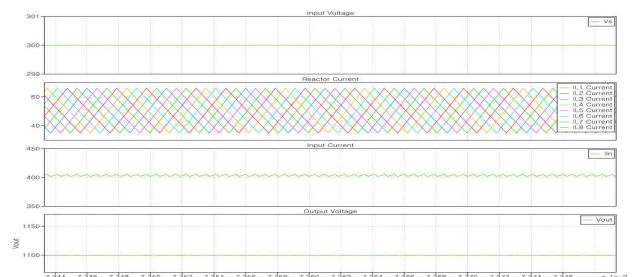


그림 3 부스트 컨버터의 8상 인터리빙 시뮬레이션 파형

Fig. 3 8-phase interleaving waveform of the boost converter

부스트 컨버터 스위칭은 Q1(Q3)과 Q2(Q4)가 서로 비대칭 상보 스위칭하여 동기 정류 동작 한다. Q1과 Q3의 위상차는 180도 인터리빙 하며, 각 모듈 Q1의 위상차는 45도 인터리빙 하여 총 8상 인터리빙을 통해 입력전류 리플이 감소시켰다.

그림 3은 8상 인터리브드 부스트 컨버터의 PLECS 시뮬레이

선 파형이다. 입력전압 300V, 출력 120kW일 때, 1상 전류 리플은 약 30A이며, 전체 입력전류 리플은 약 4A로 입력전류 리플이 크게 감소했다.

2.3 실험 결과

2.3.1 전력변환기의 구성

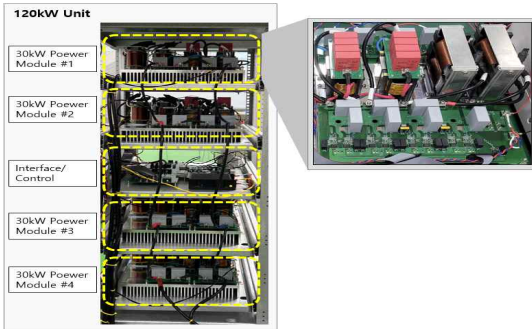


그림 2 120kW 컨버터 유닛의 구성

Fig. 2 Configuration of 120 kW converter unit

120kW 컨버터 유닛은 제어보드, 인터페이스보드, 4개의 30kW 단위모듈로 구성되며, 제어 보드에 사용된 MCU는 Texas Instruments(TI) 사의 TMS320F28388D이다.

2.3.2 효율

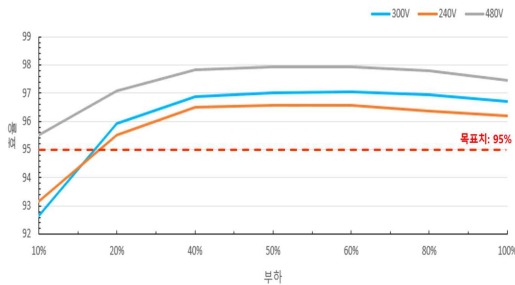


그림 4 120kW 컨버터 유닛의 효율

Fig. 4 Efficiency of 120 kW power converter

그림 4의 그래프는 120kW 컨버터 유닛의 입력전압별/ 부하별 효율 테스트 결과이다. 측정 장비로는 'YOKOGAWA WT5000'를 사용하였고, 결과적으로 정격부하에서 95% 이상의 효율을 달성하였으며, 입력전압 480V, 부하 60%일 때 최고 효율 97.95%를 달성하였다.

2.3.2 Droop 제어를 적용한 병렬운전

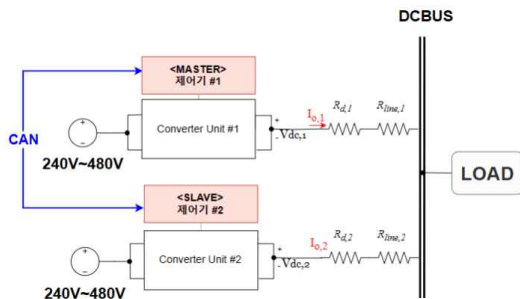


그림 5 Droop 제어 시험 구성도

Fig. 5 Droop control test configuration

그림 5는 Droop 제어 시험 구성도이다. 120kW 컨버터 유닛을 2개의 60kW 컨버터 유닛으로 제작하고, 각 제어기는 Master/Slave로 구분되어 CAN 통신하여 병렬운전 제어에 필

요한 정보를 주고받는다. V_{dc} 는 전력변환기의 출력전압, I_o 는 출력전류, $R_{d,n}$ 는 가상저항, $R_{l,n}$ 은 선로 저항이다.

$$V_{ref} = V_{dc,ref} - R_{d,n} \cdot I_{o,n} \quad (1)$$

Droop 제어를 적용한 출력전압 지령치(V_{ref})는 식(1)과 같이 부하에 따라 출력전압 지령치(V_{ref})를 조절하며 제어한다. 출력전압 레퍼런스($V_{dc,ref}$)에서 가상저항을 조절하여, 선로 저항 차이로 부하분담이 정확히 되지 않는 문제를 해결한다. 그러나, 가상저항이 크면 부하분담 성능이 향상되지만, 출력전압의 저하 크기가 커지게 된다. 따라서 MASTER Unit에서 크기가 감소한 출력전압을 제어한 보상 값을 CAN 통신을 통해 SLAVE Unit에 전송하여 출력전압 지령치(V_{ref})에 더해주는 기법인 Secondary 제어를 적용하여 출력전압을 보상한다.^[2]

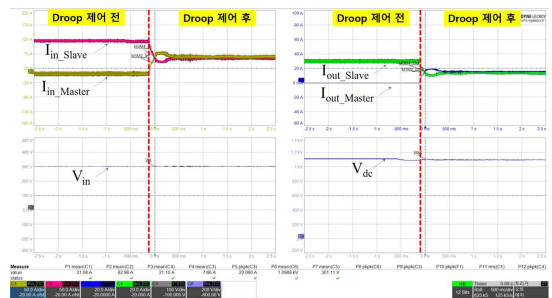


그림 6 Droop 제어 시험 파형

Fig. 6 Drop control test waveform

그림 6은 Droop 제어 시험 결과 파형이다. Droop 제어를 적용하기 전에는 60kW 컨버터 유닛 2개가 부하분담이 이루어지지 않지만, Droop 제어 후에는 적절한 부하분담이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한, Secondary 제어를 통해 출력전압을 보상하여 Droop 제어를 적용한 후에도 1,100V로 안정적인 출력전압이 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 120kW급 선박용 연료전지 시스템을 위한 고효율 모듈형 전력변환기의 시제품을 설계 및 제작하고 시험을 통하여 정격부하에서 효율 95% 이상을 달성했다. 제안된 120kW 컨버터 유닛은 2상 인터리빙 부스트 컨버터와 공진형 컨버터의 2단 구조로 구성된 30kW급 단위 모듈 4개를 병렬 운전하여 총 8상 인터리빙 컨버터로 구성하였다. 유닛의 병렬 운전은 Secondary 제어를 이용한 Droop 제어를 적용하여 부하 분담 성능이 향상했다.

제안된 120kW급 선박용 연료전지 시스템을 위한 모듈형 전력변환기와 병렬운전 제어기법을 기반으로 하여, 향후 MW급의 선박용 연료전지 전력변환기를 개발 완료할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Hye-Ryoung Park, "Development of High Current Power Converter for Ship Fuel Cell System", Power Electronics Conference, 103-104, 2022.
- [2] Yeon-Woo Kim, "Development of 80kW Bi-directional Hybrid-SiC Boost-Buck Converter using Droop Control in DC Nano-grid", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics v.22 no.4 ,pp. 360 - 368 , 2017