

# 대용량 연료전지 발전시스템용 전력변환기 개발

이진희, 백승택, 정홍주, 강호현, 정준모, 서인영  
(주)효성 중공업연구소

## Development of Power Conditioning System for High Power Fuel Cell System

Jinhee Lee, Seungtaek Baek, Hongju Jung, Hohyun Kang, Joonmo Chung, Inyoung Suh  
Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation

### ABSTRACT

This paper presents the design, development and performance of a power conditioning system (PCS) for application to a 250kW Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) generation system. A DSP controller was used to control the dc-dc and dc-ac converter operation for grid connection and power injection to the grid. The controller must also supervise the total PCS operation while communicating with the fuel cell system controller. A control method for parallel operation of dc-dc converters was proposed and verified. A 250kW prototype was successfully built and tested. Experimental performances are compared to minimum target requirements of the PCS for MCFC.

### 1. 서 론

기존 발전 설비의 경우 연료는 연소에 의해 열에너지로 변환되고 열에너지는 다시 기계적인 에너지로 변환시켜 발전기에 의해 전기에너지를 얻는 과정을 거치게 된다. 이 연소기관을 통한 소형발전설비의 경우 효율은 약 20% 정도로 낮을 뿐 아니라, 발전과정의 부산물로 열과 CO, CO<sub>2</sub> 및 질소 산화물, 황 산화물, 매연 등의 유해물질이 다량 발생하게 된다. 한편, 연료전지는 수소와 산소의 반응에 의해 연소과정 없이 전기화학적으로 전기를 발생시키는 것으로 타 대체에너지에 비해 효율이 약 40% 정도로 높으며 전기이외에도 물과 열이 부산물로 생성된다. 이렇게 발전과정에서 발생된 열은 급탕과 난방에 사용될 수 있으며, 이 경우 전체 효율은 80%를 넘게된다. 이와 같이 연료전지는 효율이 높고 CO<sub>2</sub>의 배출을 크게 감소시킬 수 있기 때문에, 최근 지구 온난화와 석유에너지 고갈 문제의 유력한 해결방안으로 제시되어 선진국에서 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 소음이 거의 없고 대기 오염의 원인이 되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 및 매연이 매우 작은 장점을 가지고 있어 미래의 새로운 에너지원으로 기대되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

연료전지와 같이 여러 산재생에너지 발전 시스템들은 중래 원거리 집중식 발전 방식보다는 수용가에 인접한 분산형 발전 방식으로 이용될 가능성이 많다. 이와 관련하여, 향후 전력에너지 수요를 포함한 에너지 수요와 분산형 전원 시장에 대한 예측들에 관심이 기울여지고 있다.<sup>[3,4]</sup>

본 연구는 기존 집중식 화력발전소등을 대체할 수 있는 MCFC 발전시스템에 적용될 PCS를 설계, 제작하고 그 성능을 확인하는데 목적이 있다.<sup>[5]</sup>

### 2. 본 론

#### 2.1 전체 시스템 구성

그림 1은 250kW급 전력변환기 전체 구성도를 나타낸다. 본 시스템의 구성은 크게 네 가지로 구성된다. 연료전지 입력 전압을 승압시키기 위한 부스트 컨버터와 직류전원을 교류전원으로 변환하기 위한 인버터, PCS 제어와 HMI로 구성된 제어반 그리고 PCS 출력을 계통과 연계시키는 배전반으로 구성된다. 표 1은 250kW급 연료전지용 PCS 사양을 나타낸다. 제시된 사양을 기준으로 시스템을 설계, 제작하였고 성능을 평가하였다.

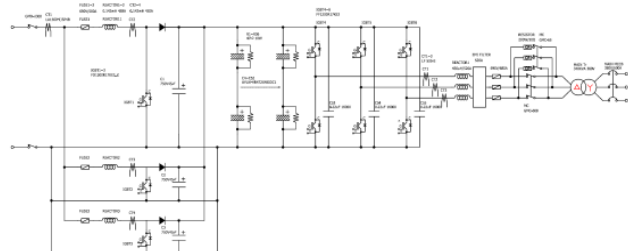


그림 1. 250kW급 전력변환기 전체 시스템 구성도

Fig 1. Configuration of the 250kW Power Conditioning System

표 1. 시스템 설계사양

Table 1. Specification of 250kW PCS

구분		설계사양	
정격전력용량		250kW (up to 340kVA)	
DC-DC 컨버터	입력사양	전압	284V <sub>DC,nominal</sub> , (250V <sub>DC</sub> ~500V <sub>DC</sub> )
		최대전류	1200A <sub>MAX</sub> (@ 284V <sub>DC</sub> )
		최대전류리플	5% 미만 (@ 정격전류, 1kHz이하)
		최대전압리플	10V 미만(@ 1kHz 이하)
DC-AC 인버터	출력사양	전압	700V <sub>DC</sub>
		전압	3Ø 380V
		전류	0~657A <sub>MAX</sub>
		주파수	60Hz± 0.3Hz
		전고조파왜율 (THD)	독립운전 : 5% 이내 (전압) 연계운전 : 5% 이내 (전류)
		전력품질	IEEE-519
정격전력용량		250kW (340kVA)	
전력변환효율		90% 이상	
출력전력역률		계통연계지점에서 0.9 이상	
보호기능		OV, UV, OC, OT, SC	
냉각방식		강제공냉	
주변온도		40℃ MAX	

## 2.2 DC-DC 부스트 컨버터

그림 2는 본 시스템에 적용한 DC-DC 부스트 컨버터의 회로도도를 나타낸 것이다. 연료전지의 저전압, 대전류 특성을 고려하여 승압형인 부스트 컨버터 3대를 병렬로 구성하였으며, 입력전류 리플저감을 위해 Interleaved Switching을 적용하였다.<sup>[6]</sup>

또한, 제한적인 반도체 소자의 전류용량을 극복하기 위해서 각 컨버터 소자들을 병렬로 연결하였다.

기존의 출력 전압 제어만을 구현했을 경우, 다상 부스트 컨버터의 인덕터 전류 불균형이 발생할 수 있고 이러한 전류 불균형은 전력 불균형을 야기시키고, 또한 전력변환기의 효율저하 및 신뢰성에 심각한 문제를 발생 시킬 수가 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 컨버터 각 상의 인덕터 전류와 출력 전압을 동시에 제어할 수 있도록 그림 3과 같이 다상 부스트 컨버터의 제어기를 설계하고 구현하였다.

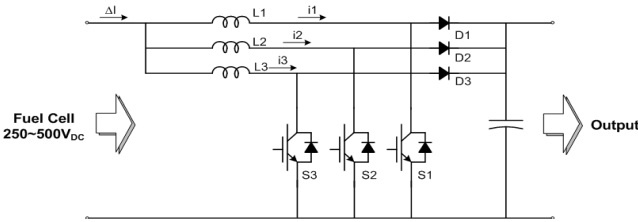


그림 2. Interleaved DC-DC 부스트 컨버터  
Fig 2. Interleaved Boost DC-DC Converter

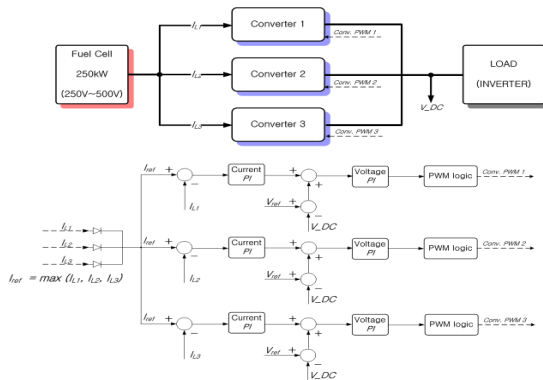


그림 3. DC-DC 컨버터 제어블럭도  
Fig 3. Control block diagram of DC-DC boost converter

## 2.3 DC-AC 인버터

그림 4는 계통연계를 위한 3상 인버터의 단선도를 나타낸다. 인버터의 고조파 필터는 다음을 고려해서 설계하였다.

- 고조파 감쇄율에 의한  $L_f C_f$ 의 공진주파수( $f_c$ ) 결정
- 계통연계시 전류제어 제어응답특성
- 리액터( $L_f$ )의 기본파 전압 강압률을 5~10%로 선정
- 인버터 출력전압 및 전류의 고조파 왜형률(THD).

전체 시스템의 효율적인 제어를 위해 제어보드는 저가격, 고성능 DSP인 TMS320F2812를 적용하였고 반도체 스위칭 소자의 정격을 고려해서 각 스위칭 소자들은 병렬운전을 적용하였고 계통과 연계하기 위해 절연변압기를 사용하였다.

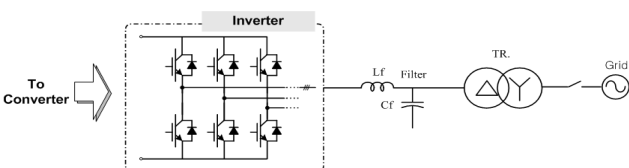


그림 4. DC-AC 인버터, 저주파변압기, 계통배전반.

Fig 4. DC-AC Inverter, Low Freq. Transfomr, Distributed panel

전체 시스템의 효율적인 제어를 위해 제어보드는 저가격, 고성능 DSP인 TMS320F2812를 적용하였고 반도체 스위칭 소자의 정격을 고려해서 각 스위칭 소자들은 병렬운전을 적용하였고 계통과 연계하기 위해 절연변압기를 사용하였다.

인버터의 제어는 크게 두 가지로 구성이 된다. 하나는 구내 부하에 전력을 공급하도록 제어하는 독립운전이고 다른 하나는 계통으로 연료전지에서 발생된 전력을 공급하도록 하는 계통연계제어이다. 연료전지에서 발생된 직류전압이 인버터가 요구하는 전압으로 충전이 되면 인버터는 독립운전모드로 운전을 시작한다. 계통연계제어모드로 PCS 운전모드를 변경하기 위해서 독립운전 시 인버터 출력전압의 크기와 위상을 계통전압과 동기시킨 후 계통과 연계를 하게된다. 계통연계 시 과전류 발생을 억제하기 위해서는 계통과의 위상을 정확히 동기시키는 제어가 매우 중요하다.

## 3. 실험 결과

표 1의 설계사양에 준해서 250kW급 PCS를 제작하였고 연료전지를 모의하기 위한 시험장치를 별도로 제작하였다. PCS 성능시험을 위한 시스템 회로도도를 그림 5에 나타내었다.

본 연구에서 개발한 PCS의 성능 실험 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 다상 부스트 컨버터의 스위칭 신호와 인덕터 전류파형을 나타낸다. 부스트 컨버터 3대가 병렬로 연결된 컨버터의 각 스위칭 신호는 120° 위상차를 가지고 동작하므로 각 컨버터의 인덕터 전류는 120° 위상차를 가진 전류로 출력됨을 확인할 수가 있다. 따라서 컨버터의 입력측 전류는 3개의 인덕터 전류로 인해서 전류리플이 저감된 효과를 얻을 수가 있다. 그림 6(b)은 독립운전에서 계통연계운전으로 전환할 때의 파형이다. 계통연계시 인버터 출력전압의 크기와 위상을 동기시킴으로써 과전류가 발생하지 않고 연계가 되고 있음을 알 수가 있다. 계통연계 후 일정시간 동안은 독립운전모드(전압제어)로 지속이 되다가 연계제어(전류제어) 모드로 전환되게 된다. 이 때의 동작파형을 그림 6(c)에 나타내었다. 과도현상이 없이 제어가 원활히 수행되고 있음을 확인할 수가 있다. 그림 6(d)는 계통연계운전으로 250kW 전력을 계통으로 공급하고 있는 파형을 나타낸 것이다. 이 때 인버터의 무효전력 제어에 의해서 계통과의 연계지점 역률은 거의 1로 제어됨을 알 수가 있다.

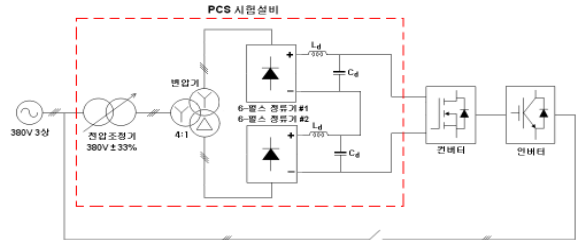
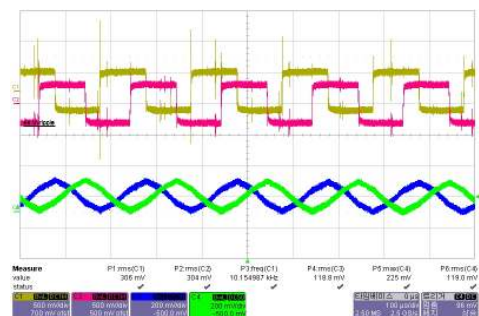
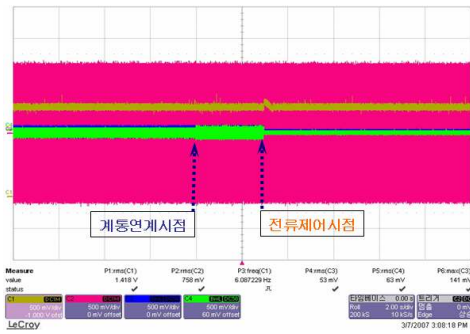


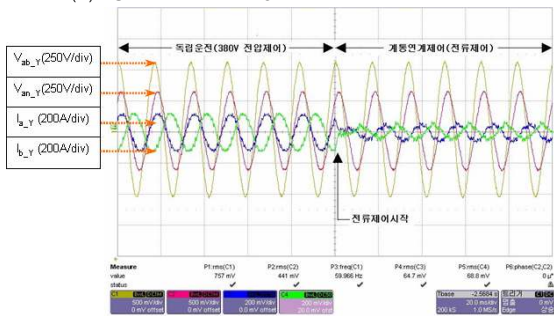
그림 5. 250kW급 PCS 시험설비  
Fig 5. Test bench of 250kW PCS



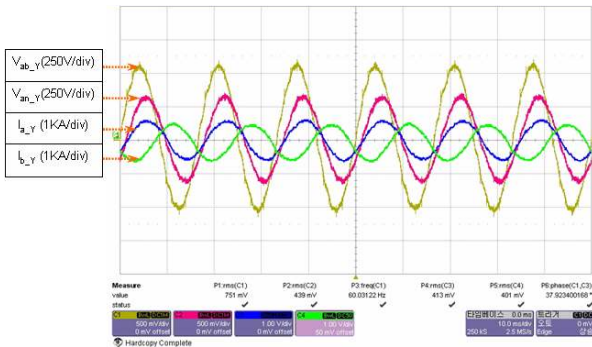
(a) DC-DC 컨버터 스위칭 및 인덕터 전류파형  
(a) DC-DC converter Switching & Inductor current



(b) 독립운전에서 연계운전으로 전환  
 (b). Stand-alone to Grid-connected mode



(c) 전압제어에서 전류제어모드로 전환  
 (c). Voltage control to Current control mode



(d) 250kW 정격부하 운전(계통연계제어)  
 (d) Rated power operation of 250kW PCS (Grid-connected)

그림 6. 250kW급 PCS 성능시험 결과  
 Fig 6. Performance waveform of 250kW PCS

그림 7은 제작된 250kW급 PCS의 전부하 영역에서의 전력 변환효율을 나타낸 그래프이다. PCS 설계사양인 변환효율 90% 기준이상으로 만족하는 성능을 보이고 있다.

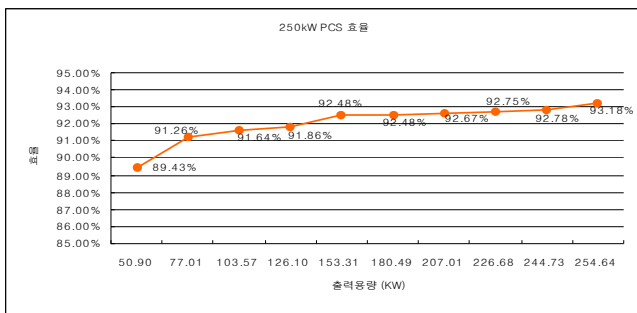


그림 7. 250kW PCS의 전부하 효율곡선  
 Fig 7. Efficiency curve of 250kW PCS

그림 8은 PCS의 출력전력품질인 전류왜형율(THD)를 나타낸 것이다. 정격부하운전시 전류 THD가 5%미만인 설계사양에 대해서 실제 PCS 출력전류의 THD가 4.4%인 성능을 나타내고 있다.

표 2는 250kW급 PCS의 성능평가 결과를 간략히 정리한 것이다. 본 연구에서 개발한 PCS의 성능이 설계평가사양에 부합되는 성능을 보이고 있다.

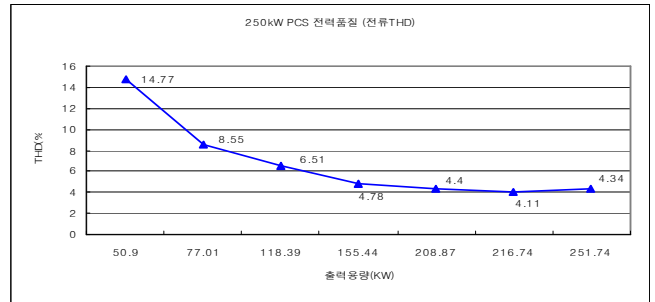


그림 8. 250kW PCS의 전력품질곡선(전류THD)  
 Fig 8. Power quality of 250kW PCS (Current THD)

표 2. 250kW급 PCS 성능평가 결과  
 Table 2. Performance evaluation for 250kW PCS

항목	성능기준사항	본 시스템 성능결과
출력주파수	60Hz±0.3Hz	59.8~60.19Hz
출력전력품질 (정격운전시)	전압THD 5% 이하	3.3% 이하
	전류THD 5% 이하	4.4% 이하
전력변환효율	정격운전시 90%이상	93.1%

#### 4. 결론

본 논문은 250kW급 MCFC 발전시스템 적용을 위한 PCS 시스템의 설계사양을 기준으로 PCS를 설계, 제작하고 성능시험 결과를 기술하였다. 성능시험결과 평가기준을 만족하는 성능을 보이고 있고 대용량 연료전지용 PCS 설계 및 제작 기술을 확보하는 계기가 되었다. 또한 본 시스템에 적용된 다상 부스트 컨버터의 안정적인 제어기법과 계통연계운전 기술에 대한 중요한 기초자료를 얻을 수 있었다는 점에서 큰 의의를 둘 수 있다.

본 논문은 산업자원부, 에너지 관리공단, 수소연료전지 사업단의 산재생에너지 기술개발 실용화평가사업으로 진행된 연구결과임.

#### 참고 문헌

- [1] 이원용, "가정용 연료전지 코제네레이션 시스템", 전력전자학회지, 제6권, 제2호, pp.11~20, 2001. 4
- [2] 최세완, "연료전지 발전시스템에서의 전력전자기술", 전력전자학회지, 제8권, 제4호, pp30~35, 2003. 8
- [3] 임희천, "100kW급 용융탄산염형 연료전지 발전시스템 개발", 전기저널, pp17~27, 2000. 7
- [4] 한수빈, "연료전지시스템과 부하관리 응용", 한국전력전자학회, pp21~25, 1997. 6
- [5] 정홍주, 이정민, 정준모, 서인영, "250kW급 연료전지용 전력변환기 개발", 전력전자 하계학술대회 논문집, pp185~187, 2006. 6
- [6] R. Giral, L.M.Salamero, S.Singer, "Interleaved Converters Operation Based ON CMC", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol 14, No. 4, pp 643~652, July, 1999.