

고효율 DC-DC 컨버터와 인버터에 의한 연료전지발전용 전력변환기 연구

주 영아, 한 병문, 오 은태, 이 준영
 명지대학교

Study on Power Converter for Fuel Cell Power Generation
 with Highly Efficient DC-DC Converter

Young-Ah Ju, Byung-Moon Han, Eun-Tae Oh, Jun-Young Lee
 Myongji University

Abstract - 본 논문에서는 고효율 DC-DC 컨버터와 인버터에 의한 연료전지발전용 전력변환기를 제안한다. 제안하는 전력변환기는 Boost Converter와 LLC공진 컨버터의 2 stage 조합으로 구성되어 있다. 제안하는 전력변환기의 동작을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 연료전지의 출력 동특성을 나타내는 모델과 제안하는 전력변환기의 모델을 개발하였다. 시뮬레이션모델의 검증용을 위해 하드웨어장치를 구성하여 실험을 실시하였다. 제안하는 전력변환기는 정격출력에서 저전압특성을 갖는 연료전지를 전력계통에 고효율로 연계하는데 유용할 것으로 보인다.

은 평형전위에서 분극(Polarization)현상에 따른 손실로 비선형적인 특성을 보인다. 분극현상에 따른 전압 손실분은 3가지로 분류할 수 있는데 활성화분극(Activation polarization)과 농도분극(Concentration polarization), 저항분극(Ohmic polarization)이다. 이로 인해 정격일 때의 전압이 무부하의 약 50%에 달하는 심한 전압 변동이 나타나게 된다.

그 밖에 연료전지는 연료 압력, 촉매, 활성화 에너지, 온도, Stack단면적, Cell개수 등 주변조건에 의해서도 영향을 받는다. 그림 1은 PSCAD/EMTDC를 이용한 연료전지(PEMFC)의 모델링으로서 연료전지 관련 파라미터들을 반영하여 실제 연료전지 출력의 동특성을 확인하였다.

1. 서 론

연료전지는 높은 에너지 효율, 친환경적, 저소음, 시스템 구축이 용이해 설치장소의 제약이 적고 상시발전이 가능한 잠재성 있는 신·재생 에너지원이다. 연료전지의 종류 중 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 고체고분자막을 이용하여 수소와 산소 연료의 전기화학적 반응을 통해 전기에너지를 생성하고 부산물로 열에너지와 물을 생산하는 발전 형태로 시스템의 단순성과 높은 전력밀도를 갖는다.[1] 그러나 분극현상에 따른 손실로 비선형적인 특성을 가지며 수십 볼트의 저전압 출력 특성으로 인해 220V, 60Hz의 전력계통에 연계하여 발전하기 위해서는 반드시 고효율 전력변환기가 요구된다.

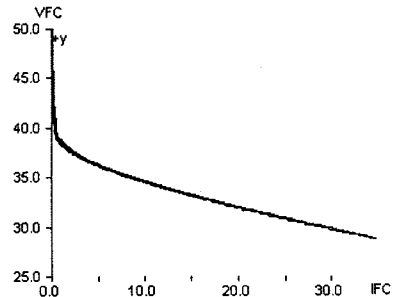
본 연구에서는 연료전지발전의 낮은 직류 출력전압을 2단 구성의 DC-DC 컨버터를 사용하여 400V로 승압시키고 이를 DC-AC 인버터로 보내어 60Hz 교류로 변환하는 전력변환기를 제안하였다. 제안하는 전력변환기의 동작을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 연료전지의 시뮬레이션 모델과 제안하는 전력변환기의 시뮬레이션모델을 개발하였다. 이 시뮬레이션모델의 분석결과를 바탕으로 하드웨어장치의 모의실험을 실시하여 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 연료전지(PEMFC) 동작원리 및 특성

고분자 전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)는 단순성과 높은 동력밀도 때문에, 분산전원과 같은 발전설비용뿐만 아니라 현재 유일하게 승용차용 동력발생장치로 고려되고 있을 정도로 뛰어난 성능을 가지고 있다.[1]

PEMFC는 연료전극(anode)에서 수소가 산화되면서 생성된 양성자 또는 수소이온(proton)이 고체 고분자막을 통해 산소의 환원이 일어나는 음극(cathode)쪽으로 전달되는 전기화학반응을 통해 전기에너지를 생산하는 발전 시스템으로서 부산물로 물(H₂O)과 열에너지를 생산한다. 기스 자유에너지에 의한 Nernst모델을 통해 이상적인 연료전지 전위를 구할 수 있지만 실제 연료전지 출력전압



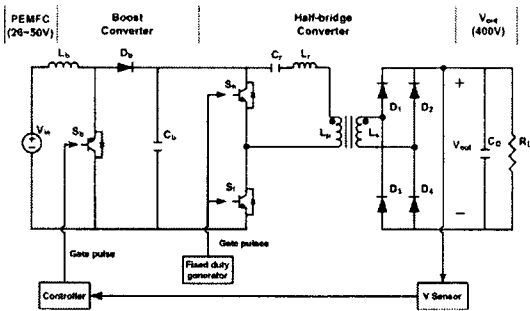
<그림 1> PSCAD/EMTDC를 이용한 PEMFC 모델링

2.2 2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터

연료전지용 DC-DC 컨버터는 연료전지 출력특성에 따른 수십 볼트의 전압 및 전류의 심한 변동에도 불구하고 계통연계를 위한 400V의 출력전압으로 승압 및 유지되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 연료전지 특성을 충족하여 고효율 전력변환이 가능한 2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터를 제안한다.[2]

2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터는 2 stage로 설계하여 제어설계의 복잡성을 줄이고 회로가 갖는 스트레스를 분담하여 보다 높은 효율을 가진다. 그림 2와 같이 Boost 컨버터와 Half-bridge LLC 공진형 컨버터의 조합으로 구성되어 있으며 출력전압 검출부, Boost 컨버터 제어부, 고정 시비율 게이트 발생 회로를 가진다.

연료전지 출력전압을 기준으로 하여 24*48V의 컨버터 입력 전압 범위를 설정하였고 이 전압은 Boost 컨버터를 통하여 80V정도로 승압된다. 이는 컨버터 출력전압을 검출하여 Boost 컨버터의 duty를 제어함으로써 80V로 일정하게 유지하도록 설계하였다. Half-bridge LLC 공진형 컨버터는 입력 전압 80V, 출력 전압 400V로 고정 시비율로 동작하도록 설계하여 최적의 회로설계가 가능하도록 하였다.



<그림 2> 2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터

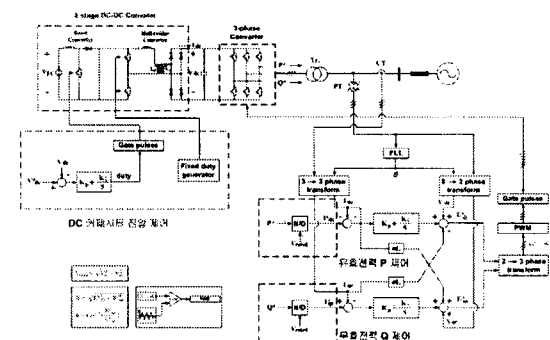
Boost 컨버터 제어부는 컨버터 출력전압을 검출하여 기준 출력전압 400V와 비교하여 PI제어기를 통해 게이트 펄스를 공급한다. Boost 컨버터 스위칭소자(S_b)가 ON되었을 때 코일(L_b)에 전류가 흐르게 되어 에너지가 축적되며 S_b 가 OFF되어 있는 동안에 다이오드(D_b)를 통하여 커패시터(C_b)를 충전한다.

Half-bridge LLC 공진형 컨버터는 고정시비율로 스위칭소자 S_h 와 S_l 에 게이트 펄스를 공급하기 때문에 변압기를 입력전압이 일정한 전압정격으로 설계를 할 수 있어 변압기의 이용률을 높일 수 있다. 스위칭 소자 S_h 또는 S_l 이 ON되었을 때 에너지를 부하에 공급하다가 두 스위치가 모두 OFF 되었을 때 저장되었던 에너지가 부하에 공급된다.

2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터는 제어가 복잡하지 않고 최적화 설계를 통하여 전력밀도를 높일 수 있다. 또한 2 stage에 걸쳐 승압시킴으로써 스위칭 소자의 전류 정격을 줄여주어 스트레스를 저감시킬 수 있다.

2.3 시뮬레이션 결과 및 분석

본 연구에서 제안한 2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터를 이용하여 연료전지발전이 전력계통과 연계되었을 시 1kW의 전력을 안정적으로 출력하도록 C 인터페이스를 이용한 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션을 수행하였다.



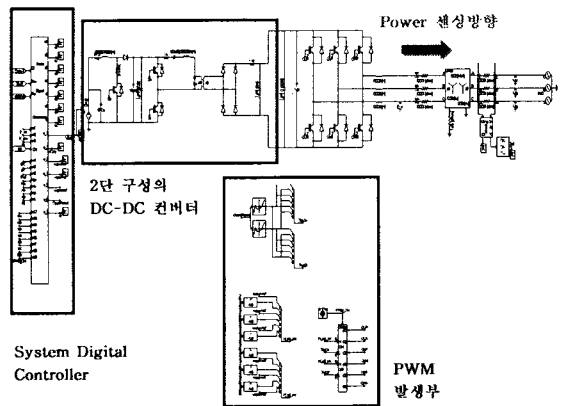
<그림 3> 시스템 제어구성도

그림 3은 연료전지발전 계통연계시스템의 제어구성도이다. 제어기의 구성은 2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터 제어부와 계통연계 인버터 제어부로 나눌 수 있다. DC-DC 컨버터 제어부는 빨강 점선박스로 표시하였으며 DC 커패시터 전압을 일정하게 유지하는 제어를 수행하고 DC-AC 인버터 제어부는 파란 점선박스로 표시하였으며 유효전력 P와 무효전력 Q의 제어를 수행한다.

먼저 DC/DC 컨버터 제어부는 DC 커패시터 전압을 기준으로 실제 DC 커패시터 전압과의 오차를 PI제어기를 통해 duty를 제어하는데 boost 컨버터 출력단의 전압

이 80V정도로 승압되어 유지가 되도록 IGBT 게이트 펄스를 인가한다. DC-AC 인버터 제어부는 3상 계통 전압/전류를 센싱받아 기준위상 θ 를 설정하여 d-q 변환한다. 유효전력 P 레퍼런스 및 무효전력 Q 레퍼런스에서 정격전압을 나눠 각각 d축, q축 전류 레퍼런스를 생성하고 위상 θ 를 기준으로 d-q 변환한 전압 및 전류를 입력으로 전류제어기를 수행한다. 이로써 d축 q축 기준전압을 생성하게 되고 역변환과 PWM을 통해 인버터 6개의 주 IGBT에 게이트 펄스를 인가한다.

그림 4는 PSCAD/EMTDC를 이용한 연료전지발전 계통연계시스템 회로도이다. System Digital Controller 내부에는 C 인터페이스를 이용하여 연료전지발전 모델링과 2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터 그리고 3상 계통 연계형 인버터 제어를 수행하였다. 연료전지발전 모델링의 출력 전압과 2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터의 게이트 펄스를 공급하고 3상 인버터를 통해 전력계통과 연계된다. 시뮬레이션을 수행함으로써 DC 커패시터 전압 400V를 유지하면서 전력계통으로 유효전력 1kW를 안정적으로 출력하도록 제어하였다.



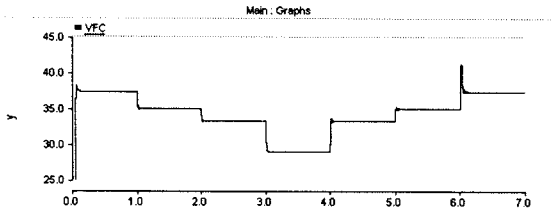
<그림 4> PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 회로도

2단 구성방식의 고효율 DC-DC 컨버터에서 출력되는 유효전력에 따라 연료전지발전에서 출력되는 전압 및 전류 변동을 확인하기 위해 표 1의 시뮬레이션 시나리오와 같이 실행하였다.

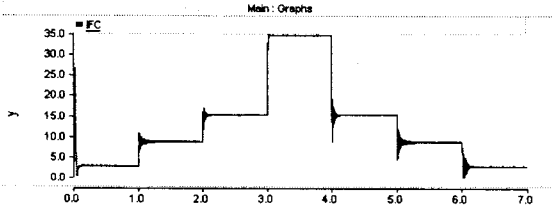
<표 1> 시뮬레이션 시나리오

시간[s]	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7
P[W]	100	300	500	1000	500	300	100

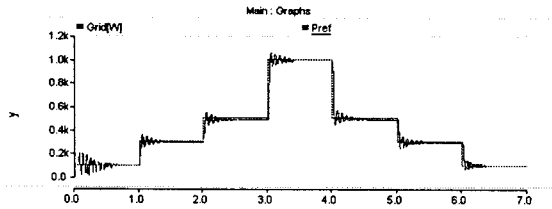
시뮬레이션 결과 그림 5와 같은 결과 파형을 얻었다. 그림 5(a)는 모델링한 연료전지(PEMFC)의 동작 전압(VFC)을 나타낸 파형이다. 유효전력 변화에 따라 동작 전압의 변동을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 연료전지(PEMFC)의 동작 전류(IFC)를 나타낸 파형으로 연료전지 전압과 마찬가지로 전력 레퍼런스에 따라 동작점이 달라짐을 알 수 있다. 그림 5(c)는 전력계통으로 출력되는 유효전력을 나타낸 것이다. 연료전지 전류 리플성분으로 인해 전력이 안정화되는데 까지 1초 미만의 시간이 소요되지만 바로 기준 전력 레퍼런스를 잘 추종하고 있음을 보이고 있다. 그림 5(d)는 DC 커패시터전압으로 표 1의 시뮬레이션 시나리오와 같이 유효전력의 변동에도 불구하고 400V로 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.



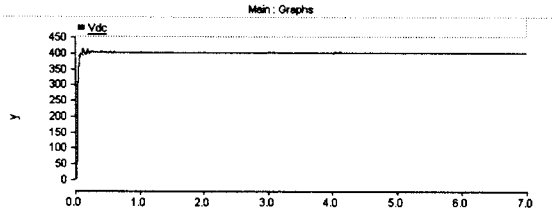
(a) 연료전지 동작 전압



(b) 연료전지 동작 전류



(c) 출력 유효전력



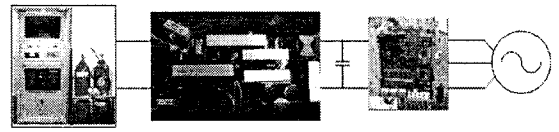
(d) DC 커패시터 전압

<그림 5> 시뮬레이션 결과 파형

2.4 하드웨어 실험 및 결과

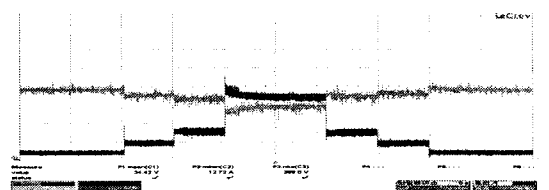
본 연구를 검증하기 위하여 그림 6과 같이 하드웨어 실험을 실행하였다. 시뮬레이션에서의 PEMFC 모델링과 전력변환기의 용량 및 기타 파라미터를 기초로 하드웨어를 제작하였다. 먼저 하드웨어제작에 사용될 연료전지는 PEMFC 타입으로써 모델명은 Ballard Nexa Power Module System이고 1.2kW의 정격 출력을 갖는다. 연료전지의 다양한 파라미터들을 고려하여 모델링을 구현하였고 그림 1과 같은 동특성을 확인하였다. 먼저 2단 구성 방식의 고효율 DC-DC 컨버터는 Boost Converter와 LLC공진 컨버터의 2 stage 조합으로 되어 있으며 Boost 컨버터의 설계를 최적화하였고 고정 시비율을 갖는 LLC 공진형 컨버터를 공진파형으로 동작할 수 있도록 설계하였고 출력전압을 제어하지 않으므로 변압기의 권수비에 의해서만 전압을 출력하도록 설계하였다.

계통연계형 3상 인버터 및 시스템을 운용하기위한 제어보드는 Texas Instrument사의 실수형 DSP(Digital Signal Processor) 인 TMS320vc33-150와 Altera사에서 개발한 100,000게이트 EPLD인 EP1K100QC208을 사용하였으며 그밖에 ADC 24ch, DAC 4ch, Digital Input 4ch, Digital Output 4ch, Encoder pulse input 1 module, RS232 port 1개 RS485 port 2개로 구성되어져 있다.

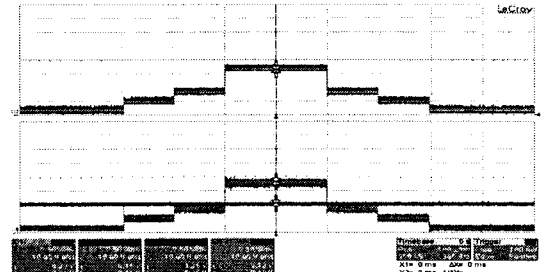


<그림 6> 하드웨어 구성도

그림 7은 그림 6의 하드웨어 실험을 한 결과 파형이다. 그림 7(a)는 연료전지 동작 전압 및 동작 전류 파형을 나타낸 것이다. 전압 및 전류는 오실로스코프를 이용하여 10V(A)/div, 시간 100s로 맞추어 실험하였다. 그림 7(b)는 듀얼모드에서의 첫 번째는 출력 유효전력을 나타낸 것으로 전력 래퍼런스를 잘 추종하고 있음을 보였다. 그림 7(b)에서의 두 번째는 DC 커패시터단 전압 및 전류 파형으로 400V 유지하면서 유효전력 변동에 비례하여 전류가 증가함으로 유효전력 래퍼런스를 일정하게 전력계통에 안정하게 출력하고 있음을 알 수 있다.



(a) 연료전지 동작 전압 및 동작 전류



(b) 출력 유효전력과 DC 커패시터단 전압 및 전류

<그림 7> 하드웨어 실험 결과

3. 결론

본 논문에서는 연료전지발전용 고효율 계통연계 전력 변환기를 모의하는 시뮬레이션모델에 관해 기술하였다. 연료전지발전 계통연계시스템에서 1kW의 전력을 고효율로 계통에 출력하기 위한 전력변환기로서 2단 구성 방식의 고효율 DC-DC 컨버터를 제안하였고, 3상 인버터를 연계하여 전체적인 시스템을 개발하였다. 이는 PSCAD/EMTDC소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 및 실험결과를 통해 분석하였고 하드웨어 실험을 통해 성능을 입증하였다.

본 연구 결과의 검증을 통해 연료전지발전시스템의 효율적인 운용과 고효율 DC-DC 컨버터 개발에 활용 가능할 것으로 판단된다.

[참고 문헌]

- [1] Gregor Hoogers, "FUEL CELL TECHNOLOGY HANDBOOK", CRC Press, 2003
- [2] 유호연, 정용민, 임승범, 이준영, 홍순찬, "1kW급 연료전지발전용 2단 구성 방식의 DC-DC 컨버터 설계", 전력전자학회, 6, pp. 46~48, 2008