연료전지발전용 고효율 계통연계 전력변환기 연구

주 영아*, 정 종규*, 심 명보*, 한 병문*, 차 한주**
*명지대학교, **충남대학교

Study on High Efficiency Power Converter for Fuel Cell Power Generation

Young-Ah Ju*, Jong-Kyou Jeong*, Myong-Bo Shim*, Byung-Moon Han*, Han-Ju Cha**
*Myongji University, **Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 연료전지발전용 고효율 계통연계용 전력변환기를 제안한다. 제안하는 전력변환기는 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터와 계통연계용 인버터로 구성되어있다. 제안하는 전력변환기의 동작을 분석하기 위해 연료전지의 출력을 모의하는 모델과 제안하는 전력변환기의 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 개발하였다. 개발한 시뮬레이션모델을 이용한 분석을 토대로 실험에 의한 검증이 가능한 하드웨어장치의 기본설계를 실시하였다. 제안하는 전력변환기는 정격출력에서 저전압특성을 갖는 연료전지를 효율적으로 전력계통에 연계하는데 유용할 것으로 보인다.

1. 서 론

교토의정서 이후 중장기적인 온실가스의 저감을 위해 신·재생 에너지원의 공급확대가 더욱 요구되고 있는 실정이다. 이에 따라 태양광발전이나 풍력발전, 그리고 최근 기술혁신이 두드러지고 있는 연료전지발전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1]

연료전지발전은 수소를 사용하여 부산물로 열에너지와 물을 생산하므로 친환경성과 에너지효율이 높다. 특히 고분자전해질 연료전지(PEMFC)는 고체고분자막을 이용한 수소와 산소의 전기화학반응으로 전기에너지를 생성하여 시스템의 단순성과 높은 전력밀도를 갖는다. 그러나 분극현상에 따른 손실로 비선형적인 특성을 가지며 출력전압이 수십 볼트의 저전압으로 220V, 60Hz의 전력계통에 연계하여 사용하기 위해서는 반드시 고효율 전력변환기가 요구된다.[2]

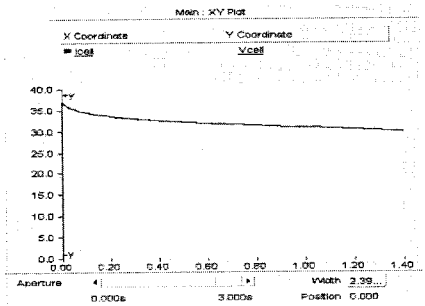
본 연구에서는 연료전지발전의 낮은 출력전압을 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터를 사용하여 400V 정도로 승압하고 이를 DC/AC 인버터로 보내어 60Hz 교류로 변환하는 전력변환기를 제안하였다. 제안하는 전력변환기의 동작을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 연료전지의 시뮬레이션모델과 제안하는 전력변환기의 시뮬레이션모델을 개발하였다. 또한 이 모델을 이용한 분석결과를 바탕으로 향후 구성할 하드웨어장치의 기본설계를 실시하였다.

2. 본 론

2.1 PEMFC 동작원리 및 특성

고분자 전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)는 연료전극(anode)에서 수소가 산화되면서 생성된 양성자 또는 수소이온(proton)이 고분자 전해질막을 통해 산소의 환원이 일어나는 음극(cathode) 쪽으로 전달되는 반응을 통해 부산물로 물(H_2O)과 열에너지를 생산한다. 양성자의 전도를 효율적으로 수행하기 위해서 액상인 물의 존재에 의존하며, 유닛 전체의 두께가 수백 마이크론 이하임에도 동력밀도는 전극 단면적 당 최대 1W/cm^{2}에 달한다.[2] 깁스 자유에너지에 의한 Nernst모델을 통해 이상적인 연료전지 전위를 구할 수 있다. 허나 실제 연료전지 출력전압은 주변 조건에 의해 이론값보다 낮게 출력되며 평형전위에서 분극(Polarization)현상에 따른 손실로 비선형적인 특성을 보인다. 이 분극현상에 따른 전압 손실은 활성화분극(Activation polarization), 저항분극(Ohmic polarization), 농도 분극(Concentration polarization) 이렇게 3가지로 분류된다.[3]

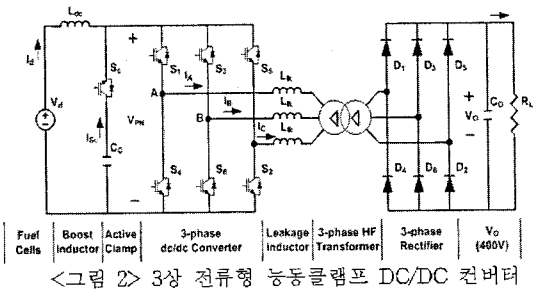
연료전지 모델링하기 위해 압력, 촉매, 활성화 에너지, 온도, Stack단면적, Cell개수 등 주변조건을 고려하여 그림 1과 같이 PEMFC 동특성을 모델링하였다.



<그림 1> PSCAD/EMTDC를 이용한 PEMFC 모델링

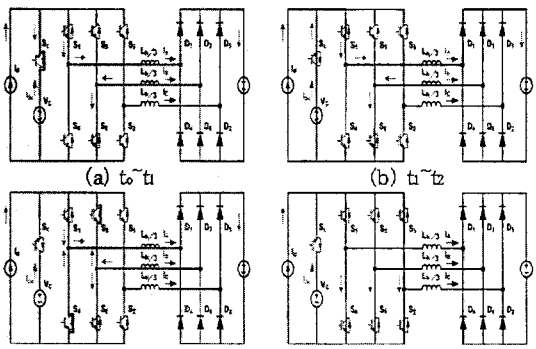
2.2 연료전지용 DC/DC 컨버터

제안하는 연료전지용 DC/DC 컨버터는 직류 400V로 승압시키기 위해 높은 승압을 필요로 하고 전류리플에 큰 영향을 받는 연료전지의 특성으로 인하여 전류형 컨버터를 제안하였다. 또한 3상 전력변환을 적용함으로써 스위치에 흐르는 RMS전류를 저감시키고, 필터소자용량 및 부피를 감소시키고 ZVS(Zero Voltage Switching)동작을 통한 스위칭 손실 저감에 따른 소부피 고효율의 컨버터를 제안함으로써 최종적으로 그림 2와 같이 연료전지용 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터를 구현하게 되었다.



<그림 2> 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터

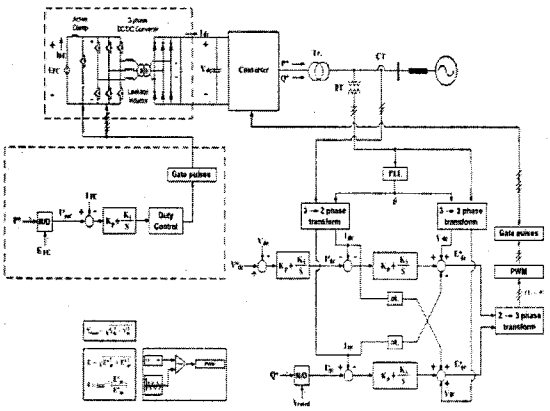
그림 3은 구간별 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터의 동작 모드를 나타낸 것으로 그림 2에서의 연료전지 전압과 부스트 인덕터는 전류원으로 등가화하여 설명하였다. 그림 3(a)구간은 S_1과 S_2를 제외한 네 개의 스위치 S_2~S_5는 턴 오프된다. 이에 따라 브리지전압(Vpn)이 상승하면서 클램프 전압(Vc)으로 클램프된다. 이 시점에서 클램프 스위치 전류(Isc)의 초기값은 -Id이다. 누설 인덕턴스(L_{lk})에 흐르는 전류는 클램프 전압(Vc)과 출력전압의 1차측 환산값인 Vo와의 전압차가 L_{lk}의 관계에 의하여 상승한다. 그림 3(b)구간은 클램프 전류(Isc)는 양의 값으로 바뀌고 클램프 IGBT SC를 통하여 흐른다. 이 구간에서 클램프 전류(Isc)는 계속 증가하고 있는 변압기 1차측 a상 전류(Ia)와 입력 전류(Id)와의 차이만큼 공급하고 변압기 1차측 전류(Ia)는 입력전류(Id)와 클램프 전류(Isc)의 합이므로 2Id까지 상승한다. 그림 3(c)구간은 t_2에서 능동 클램프 스위치 SC가 턴 오프된다. 이 때 변압기 누설 리액턴스에 축적된 에너지에 의하여 S_3과 S_4 IGBT의 커패시터가 방전되면서 브리지전압(Vpn)은 영전압이 되고 역다이오드가 도통하게 되면서 S_3와 S_4는 영전압 턴 온을 할 수 있게 된다. 그림 3(d)구간은 t_3에서 변압기 1차측 a상 전류(Ia)는 영으로 감소한다. 6개의 스위치 모두 턴 온되고 부스트 인덕터는 에너지를 축적한다. 이와 같은 과정은 같은 방식으로 반복된다.[4]



<그림 3> 구간별 동작 모드

2.3 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 및 결과

본 연구에서 제안한 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터를 이용하여 연료전지발전이 전력계통과 연계되었을 시 1kW의 전력을 안정적으로 출력하도록 C 인터페이스를 이용한 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션을 수행하였다.



<그림 4> 제어구성도

그림 4는 연료전지발전 계통연계시스템의 제어구성도이다. 제어기의 구성은 왼쪽의 점선박스와 같이 유효전력 P를 제어하는 DC/DC 컨버터부와 DC link전압을 제어하는 DC/AC 인버터부로 나눌 수 있다. 먼저 DC/DC 컨버터부에서는 유효전력 레퍼런스(P*)를 연료전지 출력전압(E_{FC})으로 나눠 연료전지 전류 레퍼런스(Iref)를 생성한다. 이를 연료전지 전류(I_{FC})와의 오차를 PI제어기를 통해 duty를 제어하여 6개의 주 IGBT와 1개의 보조 IGBT로 게이트 펄스를 인기하는 방식으로 유효전력을 제어한다. 그리고 DC/AC 계통연계 인버터부에서는 3상 계통 전압/전류를 센싱받아 기준위상 θ를 설정하여 d-q 변환한다. DC link 전압 400V를 레퍼런스로써 DC link 전압과의 오차를 PI제어기를 통해 d축 전류 레퍼런스를 생성한다. 이는 DC link 전압 제어를 수행하게 되고 q축 전류와 d-q변환한 전압/전류를 입력으로 전류제어기를 수행한다. 이로써 d축 q축 기준전압을 생성하게 되고 역변환과 PWM을 통해 인버터 6개의 주 IGBT에 게이트 펄스를 인가하게 된다. 이러한 과정을 통해 DC link 전압을 일정하게 제어하게 된다.

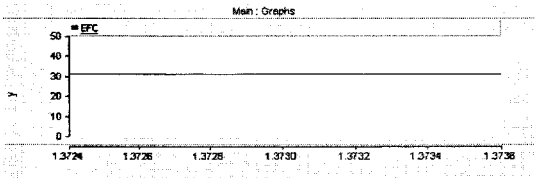
연료전지발전 계통연계시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션하였다. System Digital Controller를 이용하여 연료전지발전 모델링과 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터 그리고 3상 계통연계형 인버터 제어를 C프로그램화하였다. 그리하여 연료전지발전 모델링의 출력 전압과 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터의 6개의 주 IGBT와 1개의 보조 IGBT 게이트 펄스를 DC/DC 컨버터에 공급하고 3상 인버터를 통해 전력계통과 연계된다. 이렇듯 시스템을 구성하여 수행함으로써 DC link전압 400V를 유지하면서 전력계통으로 유효전력 1kW를 안정적으로 출력하도록 제어하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수는 표 1에 나타내었다.

<표 1> 시뮬레이션 회로정수

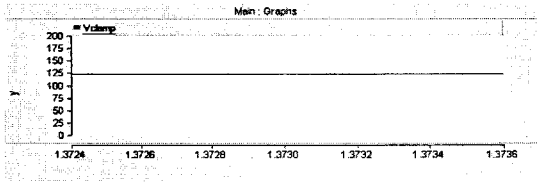
Interconnection Inverter	전원 전압	220V
	전원 주파수	60Hz
	DC링크 커패시터	6600uF
	계통연계형 리액터	4mH
DC/DC Converter	Boost Inductor	2mH
	Clamp Capacitor	240uF
	Switching Frequency	10kHz
	Leakage Inductor	13uH
	변압기 결선	Δ - Δ
	변압비	1 : 4
	출력 캐패시터	440uF
	DC link전압	400V
	출력 전력	1kW

시뮬레이션을 실행한 결과 그림 5와 같은 결과 파형을 얻었다. 그림 5(a)는 모델링한 PEMFC의 동작 전압(E_{FC}) 파형을 나타낸 것으로 약 31V의 값을 갖는다. 이는 전류를 feedback 받아 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터에 입력된다. 그림 5(b)는 클램프 회로의 클램프 전압(Vclamp)을 나타낸 것이다. 그림 3에서 언급한 클램프 전류로 인해 클램프 커패시터 양단전압은 계속 충전된 상태를 유지하게 된다. 이는 클램프 전류(Isc)의 최소값은 -Id이고 최대값은 +Id의 값으로 충전하는 에너지와 방전되는 에너지가 같게 되어 불변하게 된다. 그림 5(c)는 그림 3에서의 접근을 통하여 변압기 1차 a상 전류(Ia)와 클램프 전류(Isc)를 나타내었다. 그림 5(d)과 5(e)는 각각 시간 1~6초 구간동안의 출력 유효전력(Grid[W])과 DC link전압(Vout)을 나타낸 것이다. 먼저 그림 5(d)는 전력계통으로 출력되는 유효전력을 나타낸 것이다. 시간별로 0~2초 구간에는 1kW, 2~4초 구간에는 0kW 그리고 4~6초 구간에는 다시 1kW의 출력을 내어 유효전

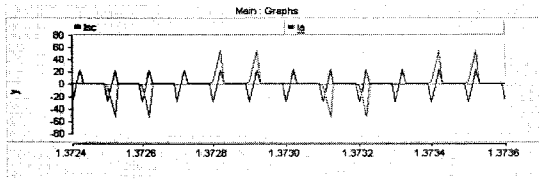
력 레퍼런스(Pref)를 추종함으로 제어가 잘 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다.효율은 약 98.4% 정도이고 1kW출력시 듀티비는 약 0.74정도이며 변압기를 포함한 전압전달비(Vout/Efc)는 듀티비 변화의 전 구간에 걸쳐 약 12.9의 값을 보여주고 있다. 그림 5(e)와 같이 DC link 전압(Vout)은 이렇듯 유효전력의 변화가 있음에도 불구하고 400V로 일정하게 유지됨을 보이고 있다.



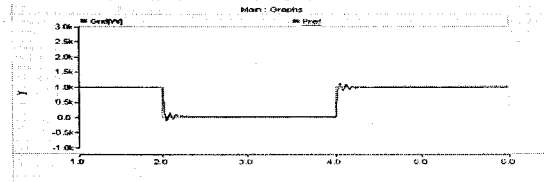
(a) 연료전지 동작 전압



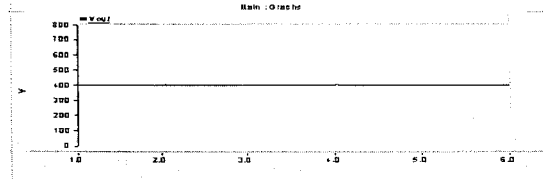
(b) 클램프 전압



(c) 변압기 1차 a상 전류와 클램프 전류



(d) 출력 유효전력



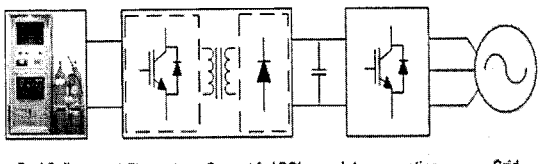
(e) DC link 전압

<그림 5> 시뮬레이션 결과 파형

2.4 하드웨어제작 설계

본 연구를 검증하기 위하여 그림 6과 같이 하드웨어 구축 계획을 갖고 있다. 시뮬레이션에서의 PEMFC 모델링과 전력변환기의 용량 및 기타 파라미터를 기초로 하드웨어제작을 설계할 예정이다. 먼저 하드웨어제작에 사용될 연료전지는 PEMFC 타입으로써 모델명은 Ballard Nexa Power Module System이고 1.2kW의 정격 출력을 갖는다. 주변조건을 고려하여 PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링구현으로 동특성을 확인하였다. 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터는 모델 PM100CSA060인 IPM(Intelligent Power Module)과 IGBT듀얼을 사용하여 구현할 것이다. 변압기는 단상 3대를 사용할 것이고 컨버터가 제대로 동작하기 위해서는 어느 정도의 누설인덕턴스를 필요로 한다. 이 누설 인덕턴스에 저장된 에너지에 의해 ZVS동작이 가능하기 때문이다.

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. TMS320vc33은 저가의 산업용 DSP로서 150MHz의 clock cycle을 사용하며 Instruction cycle은 13.3nsec로 150MFLOPS의 성능을 가진다. 메모리는 내부에 1.1Mbit SRAM이 내장되어 있으며 4개의 외부 인터럽트와 타이머 인터럽트 2개를 가지고 있다. 그리고 SPI serial interface를 지원한다. EPLD(EP1K100QC208)에는 Address decoding logic, 2-set PWM logic, protection logic, ADC control logic 등으로 구성되어 있습니다. ADC는 24ch을 받을 수 있으며 4ch씩 동시 샘플링이 가능하다. 그러므로 하나당 2.5us씩 총 10us의 변환시간이 소요된다. 즉, Analog를 Digital로 바꾸는데 10kHz 제어주기 시 90us의 여유시간이 있는 것이다. DAC는 Debugging용으로 8ch이 있다. Digital Input 4채널과 Digital Output 4채널은 외부 Relay를 구동하는데 사용되며 사용자 Interface용으로 사용된다.



<그림 6> 하드웨어 구성도

3. 결 론

본 연구에서는 연료전지발전의 낮은 출력전압을 3상 전류형 능동클램프 DC/DC 컨버터를 사용하여 400V 정도로 승압하고 이를 계통연계 DC/AC 인버터로 보내어 60Hz 교류로 변환하는 전력변환기를 제안한다. 제안하는 전력변환기의 동작을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 연료전지의 시뮬레이션모델과 제안하는 전력변환기의 시뮬레이션모델을 개발하였다. 또한 이 모델을 이용한 분석결과를 바탕으로 향후 구성할 하드웨어장치의 기본설계를 실시하였다.

제안하는 전력변환기는 정격출력에서 저전압특성을 갖는 연료전지를 효율적으로 전력계통에 연계하는데 유용할 것으로 보인다.

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

[참 고 문 헌]

[1] 杉原 英治, 辻 毅一郎, "分散型電源を含む電力系統の動向を展望", 전기평론, 04, 2008
[2] Gregor Hoogers, "FUEL CELL TECHNOLOGY HANDBOOK", CRC Press, 2003
[3] J.Haubrock, G. Heideck and Z. Styczynski, "Dynamic Investigation on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems", IEEE, 24-28 June 2007 Page(s):1 - 6
[4] 차한주, 최정완, 윤기갑, "연료전지용 3상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터", 전력전자학회, 12-6-4, 2007