

2단 구성 DC-DC 컨버터와 인버터에 의한 연료전지발전 계통연계시스템 연구

논 문
58-8-14

Study on Power Conditioning System for Fuel Cell Power Generation with 2-Stage DC-DC Converter and Inverter

주영아* · 오은태* · 한병문† · 이준영**
(Young-Ah Ju · Eun-Tae Oh · Byung-Moon Han · Jun-Young Lee)

Abstract - This paper proposes a new power conditioning system for the fuel cell power generation, which consists of a LLC resonant DC-DC converter and 3-phase inverter. The LLC resonant converter boosts the fuel cell voltage of 26-48V up to 400V, using the hard-switching boost converter and the high-frequency ZVS half-bridge converter. The operation of proposed power conditioning system was verified through simulations with PSCAD/EMTDC software. The feasibility of hardware implementation was verified through experimental works with a laboratory prototype, which was built with 1.2kW PEM fuel-cell stack, 1kW LLC resonant converter, and 3kW PWM inverter. The proposed system can be utilized to commercialize a real interconnection system for the fuel-cell power generation.

Key Words : Renewable Energy Source, Fuel Cell Power Generation, PEM(Proton Exchange Membrane) Fuel Cell, LLC Resonant DC-DC Converter

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염의 심각성 및 기존 전력 설비의 노후 등의 지속적인 문제들로 인해 신재생에너지원의 개발 및 기존 전력설비와의 연계에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 신재생에너지원에는 태양광, 풍력, 연료전지, 바이오매스 등이 있는데, 이중에서도 연료전지는 높은 에너지 효율, 친환경적, 저소음, 시스템구축의 용이성 등으로 설치장소의 제약이 적다. 또한 연료의 공급만 지속된다면 상시발전이 가능하고 전기와 열을 동시에 얻을 수 있어 많은 연구가 수행되고 있다.[1]

연료전지는 그 동안 여러 종류가 개발되어 왔는데, 이중 고분자전해질연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)는 고체 고분자막을 이용하여 수소와 산소 연료의 전기화학적 반응을 통해 전기에너지를 생성하고 부산물로 열에너지와 물을 생산하는 형태로 시스템의 단순성과 높은 전력밀도를 갖는다. 또한 분산전원과 같은 발전설비용량만 아니라 현재 유일하게 승용차용 동력발전장치로 고려되고 있을 정도로 뛰어난 성능을 가지고 있다. 그러나 연료전지는 기존의 DC 전원과는 달리 전기화학반응에 의한 분극 현상에 따른 손실로 비선형적인 특성을 가지며 수십 볼트의 저전압 출력 특성을 갖기 때문에 220V, 60Hz의 전력계통에 연계하여 발전하기 위해서는 반드시 고효율 전력

변환기가 요구된다.

그동안 연료전지용 DC-DC 컨버터로는 Full-bridge Converter, Push-pull Converter, 또는 Boost Converter가 많이 사용되어왔다. 하지만 Full-bridge Converter는 변압기의 외형은 절감되지만 많은 스위칭 소자에 따른 스위칭 손실이 큰 단점을 갖는다. Push-pull Converter는 스위치 소자의 절감에 따른 적은 손실을 갖지만 스위칭 소자의 전압 스트레스와 2조로 구성된 1차측 권선을 요구하므로 88% 정도의 낮은 효율을 갖는다. Boost Converter는 스위칭 소자수에 따른 적은 손실의 장점을 갖지만 일반적으로 3~4배의 낮은 승압비를 갖게 된다. 허나 최근에는 무변압기형 부스트 컨버터나 절연형 부스트 컨버터 등의 여러 방식으로 고승압이 가능하나 효율이 86~90%수준에 머물거나 94~96%의 고효율을 갖지만 많은 스위칭 소자, 변압기 수의 증가 등의 단점을 갖는다. 이들 컨버터들의 단점을 보완하기 위해 그동안 새로운 구조의 다양한 컨버터들이 제안되어왔고 또한 현재도 많은 연구가 진행되고 있다. [2,3,4,5,6]

본 논문에서는 기존 컨버터의 단점을 보완하여 저전압을 승압시키는 부스트 컨버터와 전기적인 절연과 동시에 효율적인 에너지전달을 위한 LLC 하프브리지를 2단으로 구성된 연료전지용 DC-DC Converter를 제안한다. 제안하는 컨버터는 공진을 이용하여 소프트 스위칭 동작을 하므로 효율이 높으며 부스트 컨버터만을 제어하여 출력전압을 400V로 일정하게 유지시켜 제어가 간단한 장점이 있다. 이를 범용 인버터와 결합하여 유효전력 1kW를 전력계통으로 전송하는 계통연계시스템을 제안하였다. 제안하는 전력변환기의 동작 특성을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 연료전지의 시뮬레이션 모델링과 전력변환기의 시뮬레이션 모델을 모의하였다. 이 시뮬레이션 모델의 분석결과를 바탕으로 실

† 교신저자, 시니어회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수 · 공학
E-mail : erichan@mju.ac.kr

* 준 회원 : 명지대 공대 전기공학과 석사과정

** 정 회원 : 명지대 공대 전기공학과 조교수

접수일자 : 2009년 5월 5일

최종완료 : 2009년 6월 15일

험을 실시하여 하드웨어구현의 타당성을 검증하였다.

2. 연료전지의 특성분석

PEM 연료전지는 양극(anode)에서 수소를 입력받아 이온화되면서 생성된 수소양성자와 전자로 분리된다. 이러한 전리현상은 백금을 촉매로 사용하여 반응속도를 증가시킨 후 고체고분자막을 통해 음극(cathode)에서 공급되는 산소와 환원반응으로 전기에너지를 생산한다. 연료전지는 전기화학반응을 통해 전기를 생산하고 부산물로 물(H₂O)와 열에너지를 생산한다.

연료전지의 이상적인 출력전압은 깁스의 자유에너지에 의한 Nernst모델을 통해 평형전위가 정해지고, 실제 연료전지의 출력전압은 이 평형전위에서 분극(Polarization)현상에 의해 감소하는 특성을 보인다.[7]

연료전지 단위 셀 전압은 교환전류밀도를 고려한 평형전위에서의 3가지의 분극 손실을 뺀 전압으로 표현되며, 비선형적인 특성을 보이며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E_{cell} = E_{rev} - E_{act} - E_{con} - E_{ohm} \quad (1)$$

여기서 E_{rev} 는 평형전위, E_{act} 은 활성화분극 손실, E_{con} 은 농도분극 손실, E_{ohm} 은 저항분극 손실이다.

한편 E_{act} 는 전극표면에서 발생하는 반응속도의 차에 의한 분극으로써 식 (2)로 표현된다. 이 식에서 i_0 는 교환전류 밀도로 연료전지 전극과 전해질 사이에서 지속적인 정반응과 역반응과 관계된 전류의 밀도를 의미한다. 교환전류(Exchange current)는 압력, 촉매, 활성화 에너지, 온도 등에 영향을 받으며, 이 값이 크면 활성화 분극이 줄어들므로써 연료전지의 출력전압 E_{cell} 이 증가하여 연료전지의 효율에 매우 중요한 파라미터이다.

E_{con} 은 반응물의 농도 기울기 차이에 의한 분극으로써 식 (4)로 표현되고, E_{ohm} 은 전해질저항, 전극저항, 도선저항으로 인한 분극으로써 식 (5)과 같이 표현된다.

$$E_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i + i_{loss}}{i_0}\right) \quad (2)$$

$$i_0 = i_0^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}}\right) \exp\left[-\frac{E_c}{RT}\left(1 - \frac{T}{T_{ref}}\right)\right] \quad (3)$$

$$E_{con} = \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (4)$$

$$E_{ohm} = iR_s \quad (5)$$

따라서 연료전지의 출력전압은 이상에 설명한 5가지 수식에 의해 표현된다. 따라서 주어진 연료전지에 대해 관련 파라미터의 값을 알고 있으면 출력전압의 특성을 쉽게 분석할 수 있다.

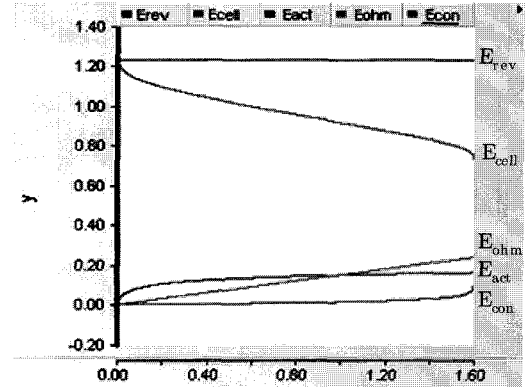


그림 1 연료전지의 전압 특성
Fig. 1 Voltage Characteristic of Fuel-cell

그림 1에 보인 그래프는 대표적인 연료전지에 대해 출력전압의 특성을 나타낸 것이다. 평형전위에 대해 세 가지 손실성분에 의해 실제 출력 전압 E_{cell} 이 비선형적으로 감소됨을 확인할 수 있다.

연료전지발전은 다수의 셀이 직렬로 결합된 스택으로 구성되어 출력단자전압을 형성한다. 따라서 스택의 전압-전류 특성을 정하기 위해서는 단위 셀의 전류밀도에 셀의 단면적을 곱해 전류 값을 구하고 단위 셀의 출력전압에 직렬로 결합된 셀의 수를 곱하여 출력전압을 구한다.

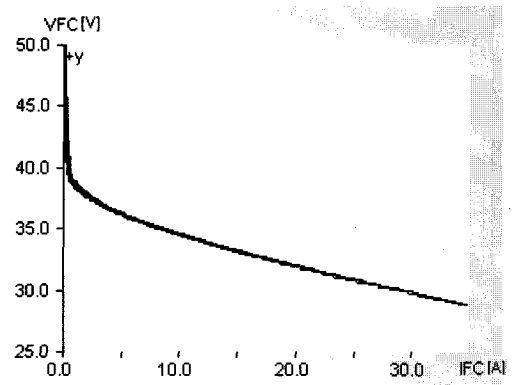


그림 2 연료전지스택의 출력특성 모델링
Fig. 2 Output Characteristics Modeling of Fuel Cell Stack

그림 2는 47개 셀로 구성된 연료전지스택의 출력특성을 나타낸 곡선이다. x축은 연료전지의 전류, y축은 연료전지의 출력전압인데 평형전위에 대해 세 가지 감소성분에 따른 실제 출력전압을 나타낸 것이다. 이 곡선은 부하변동에 따라 가변하는 연료전지의 전류-전압 특성을 나타낸 것으로 연료전지 발전용 DC-DC 컨버터를 설계하는데 필요하다.

3. 2단 구성 DC-DC 컨버터

연료전지의 출력전압은 부하변동에 따라 급격히 변동하는 특성을 갖고 있다. 따라서 연료전지용 DC-DC 컨버터는 입력전압이 급격히 변동함에도 불구하고 원만한 제동연계를

위해 출력전압은 항상 400V 정도를 유지해야 한다. 본 연구에서는 이러한 기능을 갖는 2단 구성 DC-DC 컨버터를 제안한다.

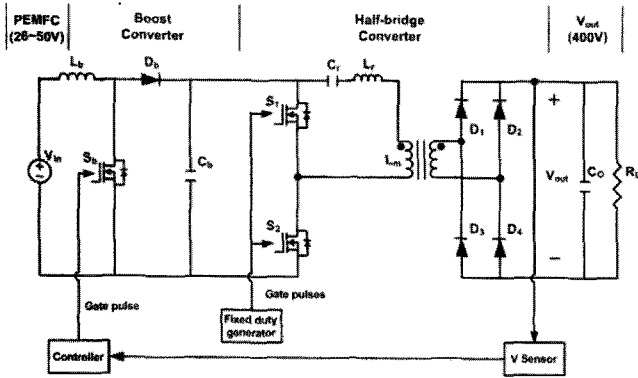


그림 3 2단 구성 DC-DC 컨버터의 회로도
Fig. 3 Circuit Diagram of 2-stage DC-DC Converter

그림 3은 제안하는 2단 구성 DC-DC 컨버터의 구성도를 나타낸 것인데, Boost 컨버터와 Half-bridge LLC 공진형 컨버터의 조합으로 구성되어 있으며, 출력전압 검출부, Boost 컨버터 제어부, 고정시비율 게이트펄스 발생회로로 구성되어 있다. 2단 구성 DC-DC 컨버터는 제어설계의 복잡성을 줄이고 회로소자가 갖는 전류/전압 스트레스를 분담하여 효율을 향상하도록 설계되어 있다.

컨버터 입력전압의 범위는 연료전지 출력전압의 변동을 고려하여 24~48V로 설정하였고 이 전압은 Boost 컨버터를 통하여 80V 정도로 승압된다. 이는 컨버터 출력전압을 검출하여 Boost 컨버터의 duty를 제어함으로써 80V로 일정하게 유지하도록 설계하였다. Half-bridge LLC 공진형 컨버터는 입력전압 80V, 출력전압 400V의 고정 시비율로 동작하도록 설계하여 최적회로설계가 가능하도록 하였다.[8,9]

Boost 컨버터 제어부는 컨버터 출력전압을 검출하여 기준 출력전압 400V와 비교하여 PI제어를 통해 게이트 펄스를 공급한다. Boost 컨버터 스위칭소자(S_1)가 ON되었을 때 코일(L_p)에 전류가 흐르게 되어 에너지가 축적되며 S_1 가 OFF되어 있는 동안에 다이오드(D_p)를 통하여 부스트 커패시터(C_0)를 충전한다.

Half-bridge LLC 공진형 컨버터는 고정 시비율로 스위칭소자 S_1 와 S_2 에 게이트 펄스를 공급하기 때문에 변압기를 입력전압이 일정한 전압정격으로 설계할 수 있어 변압기의 이용률을 높일 수 있다. 스위칭 소자 S_1 또는 S_2 가 ON 되었을 때 에너지를 부하에 공급하다가 두 스위치가 모두 OFF 되었을 때 저장되었던 에너지가 부하에 공급된다.

2단 구성 DC-DC 컨버터는 제어가 복잡하지 않고 최적화 설계를 통하여 전력밀도를 높일 수 있다. 또한 2단에 걸쳐 승압하므로 스위칭 소자의 전류정격을 줄여주어 손실을 저감시킬 수 있다.

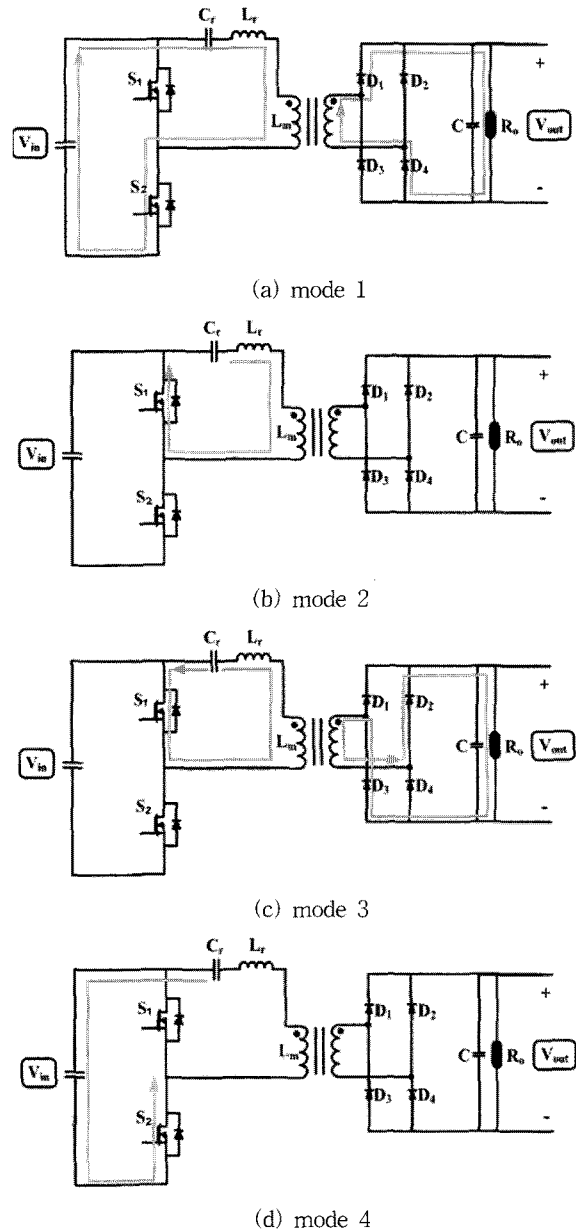


그림 4 LLC 공진 컨버터의 동작
Fig. 4 Operation of LLC Resonant Converter

그림 4는 LLC 공진 컨버터의 동작모드를 나타낸 것이다. 전단은 범용 Boost 컨버터로 그 동작원리는 이미 잘 알려져 있어 설명을 제외하였다. 후단은 공진형 반브리지 컨버터로 두개의 스위치와 공진캐패시터 C_r , 변압기 누설인덕턴스 L_r 그리고 자화인덕턴스 L_m 으로 구성된다. 변압기의 2차 측은 풀브리지 다이오드 정류기로 구성되어 있다.

그림 4(a)는 Powering 구간으로 스위치 S_2 가 turn-on 되면서 시작한다. 공진전류는 MOSFET S_2 를 통해 흐르며 에너지가 2차 측으로 전달된다. 이때 공진 캐패시터 C_r 은 충전이 되며 공진 주파수 f_r 은 L_m 이 공진에 참여하지 않도록 회로를 설정하였기 때문에 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (6)$$

2차 측은 다이오드 D_1 과 D_4 가 도통되고 자화 인덕턴스 전류는 출력전압에 선형적으로 증가된다.

그림 4(b)는 Dead-Time구간으로써 스위치 S_2 가 turn-off 되면서 시작한다. S_2 을 통해 흐르던 전류가 스위치 S_1 의 내부 다이오드를 통해 흐르고 이로 인하여 S_1 는 ZVS조건을 성립하게 한다. 이때 자화 전류는 더 이상 증가하지 않으며 2차 측으로의 에너지 전달이 차단되는 구간이다.

그림 4(c)는 Powering구간으로써 스위치 S_1 이 turn-on 되면서 시작한다. 공진전류는 스위치 S_1 을 통해 역방향으로 흐르며 C_r 에 충전되었던 에너지가 변압기를 통해 2차 측으로 전달된다. 이때 공진 주파수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 2차 측은 다이오드 D_2 와 D_3 가 도통되고 자화 인덕턴스 전류는 출력전압에 선형적으로 감소한다.

그림 4(d)는 Dead-Time구간으로써 스위치 S_1 이 turn-off 되면서 시작한다. S_1 을 통해 흐르던 전류가 스위치 S_2 의 내부 다이오드를 통해 흐르고 이로 인하여 S_2 는 ZVS 조건을 성립하게 한다. 이때 자화 전류는 더 이상 증가하지 않으며 2차 측으로의 에너지 전달이 차단되는 구간이다.

4. 시뮬레이션에 의한 검증

본 연구에서 제안한 2단 구성 DC-DC 컨버터를 이용하여 연료전지발전용 전력계통과 연계하여 효율적인 전력공급이 가능한 가를 확인하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

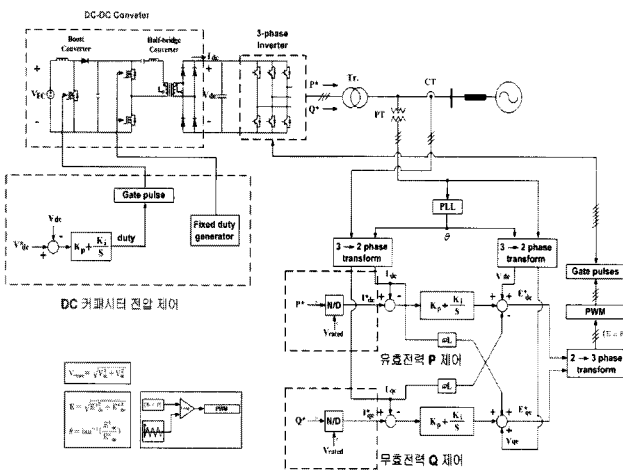


그림 5 전체 시스템의 구성도
Fig. 5 Configuration of Whole System

그림 5는 연료전지발전용 계통연계시스템의 제어기를 포함한 시스템구성도이다. 연료전지 출력전압인 V_{FC} 는 그림 2에서 언급한 연료전지스택 모델링으로 구성되어 있으며, 부하변동에 따라 급격히 전압 변동하는 특성이 반영되어 있다. 시스템 제어기는 2단 구성 DC-DC 컨버터의 제어부와 계통연계인버터의 제어부로 나눌 수 있다. DC-DC

컨버터의 제어부는 DC 커패시터의 전압을 일정하게 유지하는 제어를 수행하고 DC-AC 인버터 제어부는 유효전력 P와 무효전력 Q의 제어를 수행한다.

DC/DC 컨버터 제어부는 DC 커패시터의 기준전압과 DC 커패시터의 실측전압과의 오차를 PI제어기를 통해 해당 시비율을 정하는데, 앞단에 있는 Boost 컨버터의 출력 전압이 80V 정도로 유지되도록 MOSFET의 게이트에 펄스를 인가한다. DC-AC 인버터 제어부는 3상 계통 전압/전류를 센싱받아 기준위상 θ 를 설정하여 d-q변환을 수행한다. 또한 유효전력 P와 무효전력 Q의 기준값을 정격전압을 나눠 각각 d축, q축 전류의 기준 값을 생성하고 위상 θ 를 기준으로 d-q 변환한 전압 및 전류를 입력으로 전류제어를 수행한다. 이로써 d축 q축 기준전압을 생성하게 되고 역변환과 PWM 펄스생성을 통해 인버터 6개의 주 IGBT에 게이트 펄스를 인가한다.

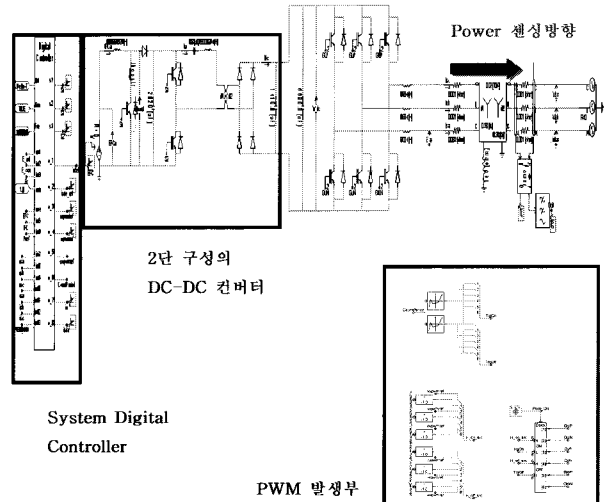


그림 6 시뮬레이션의 구성도
Fig. 6 Configuration of Simulation

그림 6은 PSCAD/EMTDC를 이용한 연료전지발전용 계통 연계시스템의 시뮬레이션 회로도이다. 이 회로도의 System Digital Controller 내부에는 C-언어로 코딩한 연료전지발전 모델링과 2단 구성 DC-DC 컨버터, 그리고 3상 계통연계 인버터의 제어기를 포함하고 있다.

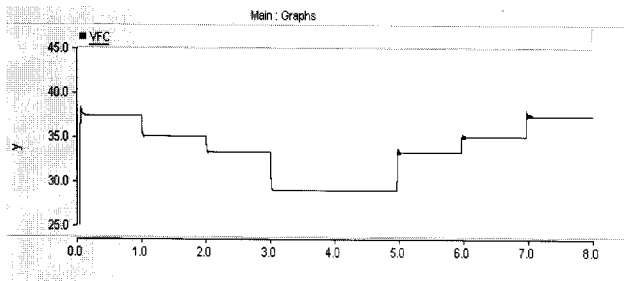
이 Digital Controller의 좌측은 연료전지의 출력생성을 위한 입력데이터, 회로에서 피드백 받는 연료전지의 입력전류 그리고 계통연계인버터의 제어수행을 위해 측정된 3상 전압/전류의 입력포트로 구성되어 있다. 한편 우측은 연료전지의 출력전압을 입력으로 주고, 2단 구성 DC-DC 컨버터에 포함된 3개 스위치에 게이트신호를 공급하고, 계통연계 인버터에 PWM 기준신호를 공급하는 출력포트로 구성되어 있다.

계통으로 공급되는 유효전력의 크기에 따라 연료전지의 출력전압과 전류의 변동을 확인하기 위해 표 1에 나타난 것처럼 0~8초까지 유효전력을 100W, 300W, 500W, 1kW와 같이 계단적으로 변화를 주고 동시에 무효전력을 독립적으로 0~300Var의 계단적 변화를 주어 동작을 확인하였다.

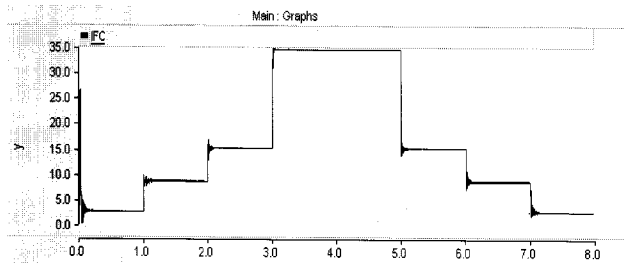
표 1 시뮬레이션의 동작 시나리오

Table 1 Operation Scenario of Simulation

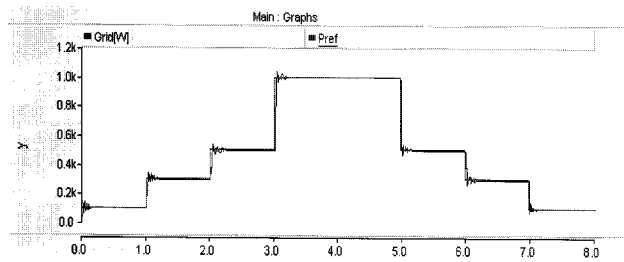
시간[s]	1	2	3	4	5	6	7	8
P[W]	100	300	500	1000		500	300	100
Q[Var]	0	300	100	0		300	100	0



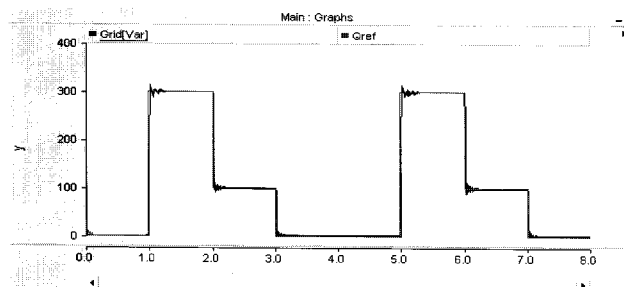
(a) 연료전지 동작 전압



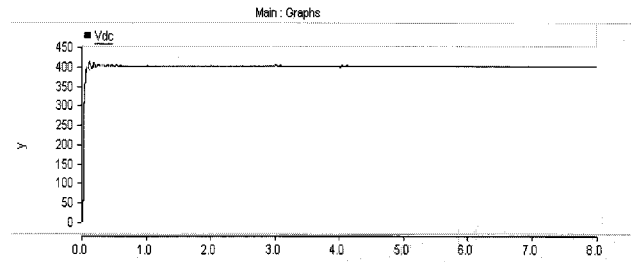
(b) 연료전지 동작 전류



(c) 출력 유효전력



(d) 출력 무효전력



(e) DC 커패시터 전압

그림 7 컴퓨터 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Computer Simulation Results

그림 7은 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 모델링 한 연료전지의 동작전압(VFC)의 변동을 나타낸 것으로, 유효전력의 변동에 따라 동작전압이 변동함을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 연료전지의 동작 전류(IFC)가 변동함 나타낸 것인데, 연료전지의 전압과 마찬가지로 유효전력이 변동함에 따라 동작전류가 달라짐을 알 수 있다. 그림 7(c)는 전력계통으로 출력되는 유효전력의 추종특성을 나타낸 파형이다. 실측 유효전력은 안정화되는데 까지 1초 미만의 과도현상을 보이지만 곧 기준 값을 추종함을 나타내 유효전력의 제어가 잘 수행됨을 알 수 있다. 그림 7(d)는 전력계통으로 출력되는 무효전력의 추종특성을 나타낸 파형이다. 실측 무효전력 또한 추종제어가 잘 수행됨을 알 수 있다. 이 때 무효전력량은 연료전지발전 정격을 고려하여 표 1과 같이 0~300Var정도로 범위를 주었다. 그림 7(e)는 DC 커패시터의 전압을 나타낸 것이다. 유효전력의 변동에도 불구하고 400V로 일정하게 유지되어 전압제어가 잘 수행됨 알 수 있다.

5. 하드웨어 실험에 의한 검증

본 연구에서는 하드웨어구현 타당성을 검증하고자 시뮬레이션에서 얻은 결과를 바탕으로 프로토타입을 제작하고 실험을 수행하였다. 그림 8은 하드웨어 구성도를 나타낸 것이다. 실험에 사용한 연료전지는 PEM 타입으로 모델명은 Ballard Nexa Power Module이고 1.2kW의 정격 출력을 갖는다. 24V의 배터리 전력으로 연료전지의 컨트롤 보드에 전력을 공급하여 컨트롤러가 초기 조작을 할 수 있도록 해주고 연료전지의 기동을 도와준다.

2단 구성 DC-DC 컨버터는 Boost 컨버터와 LLC 공진 컨버터의 2 단으로 조합으로 되어 있고 제어기는 OP Amp를 사용하는 아날로그 방식으로 되어있다. 출력전압을 일정하게 유지하는 것은 Boost 컨버터에 의해 수행하고 추가의 승압은 고정 시비율을 갖는 LLC 공진형 컨버터와 고주파변압기의 권수비에 의해서 수행한다.

계통연계형 인버터를 동작시키기 위한 제어보드는 Texas Instrument사의 실수형 DSP(Digital Signal Processor)인 TMS320vc33-150와 Altera사에서 개발한 100,000게이트 EPLD인 EP1K100QC208로 구성되어 있으며, 그밖에 ADC 24ch, DAC 4ch, Digital Input 4ch, Digital Output 4ch,

Encoder pulse input 1 module, RS232 port 1개 RS485 port 2개로 구성되어 있다. 계통연계 인버터는 PT 및 CT의 계측기를 통해 계통 3상 전압 및 전류 그리고 DC 커패시터 전압 및 전류를 측정하여 디지털제어를 수행하게 된다.

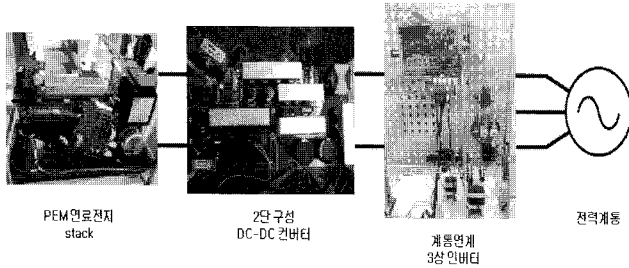


그림 8 프로토타입의 실험장치
Fig. 8 Experimental Set-Up of Prototype

실제 연료전지스택의 경우 계통에 공급되는 유효전력의 변동이 빠르게 이루어질 경우 화학반응 속도가 이를 추종하기 어려워 충분히 안정적인 동작을 고려하여 표 2에 보인 것처럼 시뮬레이션과 달리 변동의 지속시간을 100초로 하여 실험을 실시하였다.

표 2 하드웨어 실험의 동작 시나리오

Table 2 Operation Scenario of Hardware Experiment

시간[s]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
P[W]	100	300	500	1000	500	300	100			
Q[Var]	0	300	100	0	0	300	100	0		

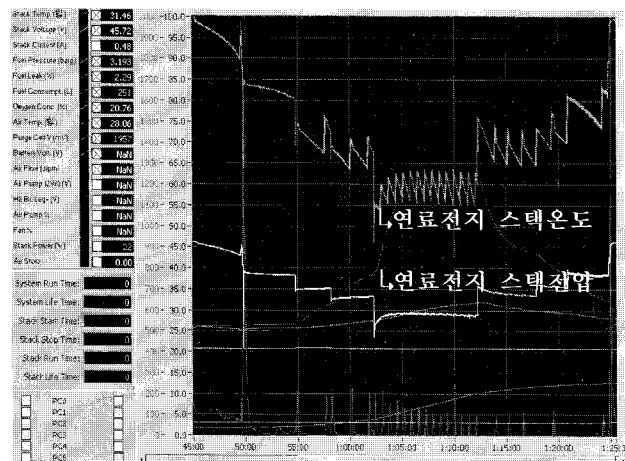
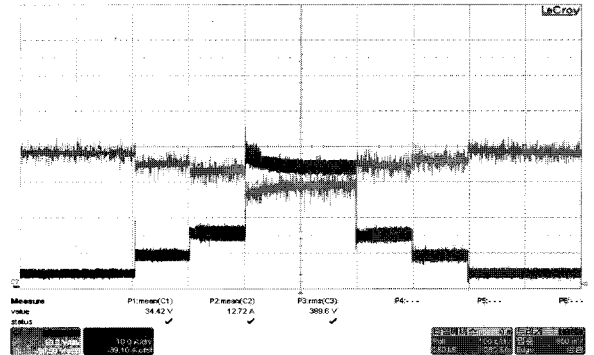


그림 9 1.2kW Nexa PEMFC의 모니터링 화면
Fig. 9 Monitoring Screen of 1.2kW Nexa PEMFC

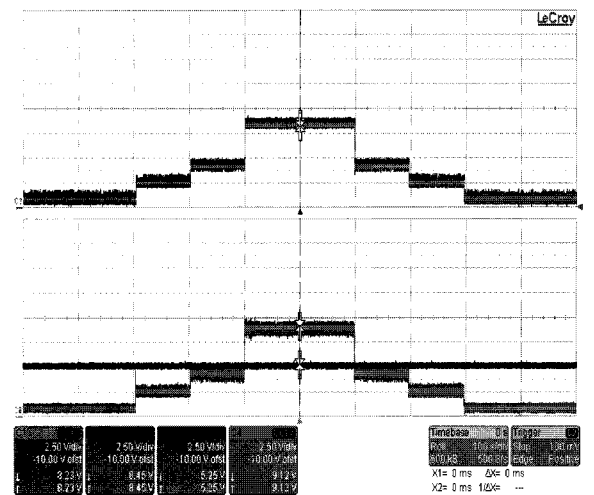
그림 9는 연료전지 가동상태를 모니터링 할 수 있도록 판매사가 제공하는 NexaMon Software의 화면이다. 이 화면의 좌측은 연료전지 상태를 나타내는 파라미터들을 표시하고 우측은 파라미터 값에 따른 곡선을 나타낸다. 연료전지의 스택전압은 유효전력의 요구량에 따라 동작점이

급격히 변동하는 것을 확인할 수 있다.

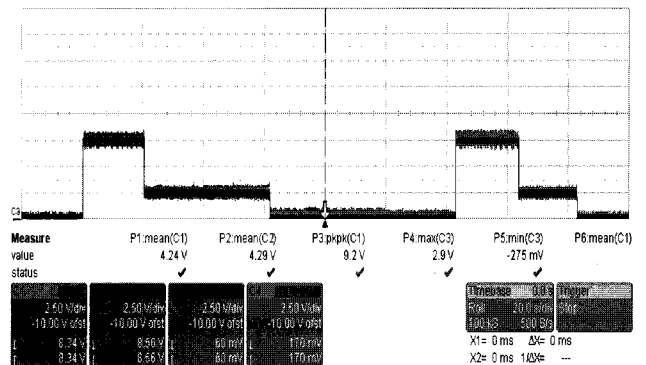
연료전지 스택온도는 무부하 및 경부하일 시에는 표준 온도인 25℃를 갖지만 중부하 및 최대부하일 시에는 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 연료전지 스택의 제어보드에서는 연료전지의 전류 및 전압, 온도, 압력 등을 가동 중에 상시로 측정하여 RS232/485 통신을 통하여 PC에 보내져 그래프와 수치로 나타낸다.



(a) 연료전지 동작 전압 및 동작 전류



(b) 출력 유효전력과 DC 커패시터의 전압과 전류



(c) 출력 무효전력

그림 10 하드웨어 프로토타입의 실험 결과

Fig. 10 Experimental Results of Hardware Prototype

그림 10은 제안하는 계통연계시스템과 연료전지를 이용하여 실험을 한 결과 파형이다. 그림 10(a)는 연료전지의 동작전압 및 동작전류를 나타낸 것이다. 오실로스코프를 이용하여 10V(A)/div로 맞추어 연료전지 전압 및 전류를 측정하였다. 유효전력 변동 시 연료전지의 전압이 안정화되는 점을 확인하여야 하므로 시간은 유효전력의 변동구간은 100s로 하였다. 유효전력이 증가하면 연료전지의 전압은 감소하게 되고 연료전지의 전류는 증가하게 된다. 반대로 유효전력이 감소하면 연료전지의 전압은 증가하게 되고 연료전지의 전류는 감소하게 된다. 그림 10(b)는 출력 유효전력과 DC 커패시터 전압과 전류를 나타낸 것이다. 첫 번째 디스플레이는 출력 유효전력을 나타낸 것으로 시물레이션과 유사하게 표 2의 시나리오에 따라 실측 유효전력이 잘 추종하고 있음을 알 수 있었다. 두 번째는 DC 커패시터의 전압과 전류를 나타낸 것인데, DC 커패시터의 전압은 유효전력의 변동에도 불구하고 400V를 잘 유지하여 시물레이션결과와 유사하게 DC-DC 컨버터는 DC 커패시터의 전압을 잘 제어함을 알 수 있었다. 결과적으로 DC 커패시터의 전압이 일정하여 유효전력의 변동은 DC 커패시터의 전류에 비례함을 알 수 있다. 그림 10(c)는 출력 무효전력을 나타낸 것이다. 오실로스코프를 이용하여 100Var/div로 맞추어 시물레이션과 유사하게 표 2의 무효전력 Q의 시나리오에 따라 실측 무효전력이 잘 추종하고 있음을 알 수 있었다.

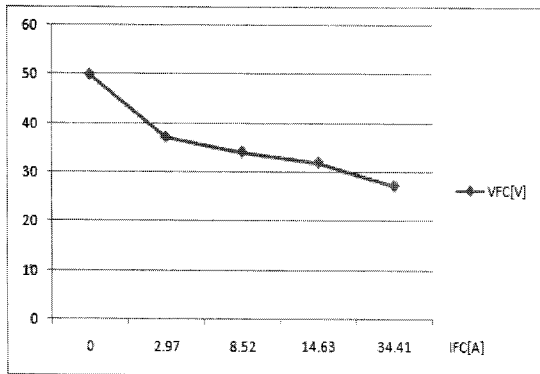


그림 11 연료전지의 측정된 전압-전류 곡선
Fig. 11 Measured Voltage-Current Curve of Fuel Cell

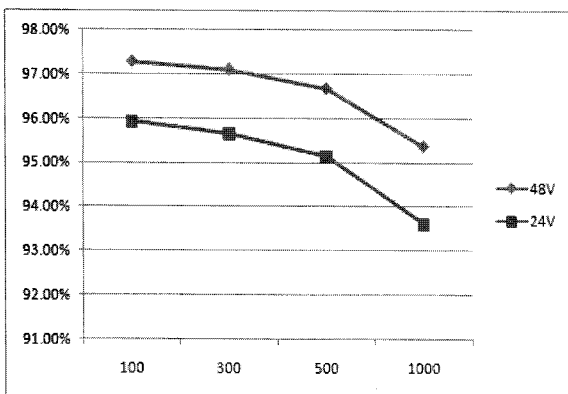


그림 12 2단 구성 DC-DC 컨버터 측정효율 (48V / 24V)
Fig. 12 Measured Efficiency of 2-Stage DC-DC Converter

그림 11은 하드웨어 실험을 통해 얻은 실제 연료전지의 전압-전류 특성곡선이다. 무부하 전압은 50V 정도이며 부하가 가중될수록 연료전지 전류가 증가하게 되고 연료전지 전압은 감소하는 형태를 보인다. 최대부하인 1kW시의 연료전지 전압은 27.3V, 연료전지 전류는 34.41A를 출력함으로써 무부하 에서부터 약 50%의 전압 강하를 보인다.

그림 12는 연료전지용 2단 구성 DC-DC 컨버터의 효율을 측정하여 나타낸 곡선이다. 컨버터의 입력전압의 범위에서 최소와 최대 전압에 대하여 부하별 효율을 측정하였다. 컨버터 입력 전압 24V이고 정격 1kW시의 효율은 약 93.5%정도이다. 실제 정격 1kW시의 연료전지 전압은 27.3V이므로 약 94%정도의 효율을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 고효율 DC-DC 컨버터와 인버터에 의한 연료전지발전용 계통연계시스템을 제안하고 그 동작을 분석한 내용을 기술하였다. 효과적인 분석을 위해 연료전지의 전기적인 특성은 이론적인 수식을 기반으로 모델링하였고, 계통연계시스템은 2단식 고효율 DC-DC 컨버터와 범용 인버터로 구성하고 전체 제어를 포함하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의하였다. 또한 효과적인 모의분석을 위해 부하는 100W에서 1kW까지를 계단적으로 변경하여 유효전력의 추종특성을 분석하였고, 동시에 무효전력을 독립적으로 0~300Var까지 계단적으로 변화주어 그 추종특성을 분석하였다. 이러한 시물레이션 결과를 바탕으로 실제 1.2kW PEM 연료전지에 연구실에서 제작한 DC-DC 컨버터와 인버터를 결합한 후 실험을 실시하여 하드웨어구현 타당성을 검증하였다.

본 논문의 연구결과는 연료전지발전용 계통연계시스템의 개발과 효율적인 운용에 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 최근 관심이 증가하고 있는 DC급전과 스마트그리드에 연료전지발전을 적용하는데 활용 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부(과제번호 R-2007-1-105-03)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 이병국, "연료전지 분산전원용 전력전자 시스템의 개발 현황 및 전망", 전력전자학회, 전력전자학회지 제8권 제 6호, 2003. 12, pp. 40~45
- [2] 김형준, 김정근, 명홍재, 박성식, 허안드레이, 최세원, "연료전지 응용을 위한 클램프회로 없는 고효율 절연형 부스트 컨버터", 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집 전력전자학회 2007년도 전력전자학술대회 논문집, 2007. 7, pp. 362~365

- [3] 한동화, 김영식, 정병환, 최규하, “연료전지용 풀브릿지 컨버터 효율분석”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집 전력전자학회 2008년도 학술대회 논문집, 2008. 6, pp. 21~23
- [4] 양진영, 박찬기, 최세완, 남석우, “연료전지 응용을 위한 높은 승압비와 낮은 전류리플을 갖는 무변압기형 부스트 컨버터”, 전력전자학회, 전력전자학회논문지 전력전자학회 논문지 제13권 제2호, 2008. 4, pp. 79~87
- [5] Mousavi, A.; Das, P.; Moschopoulos, G.;"A ZCS-PWM Full-Bridge Boost Converter for Fuel-Cell Applications", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE 15-19 Feb. 2009 Page(s):459~464
- [6] 권완성, 김영식, 이영진, 한동화, 바이사, 정병환, 신우석, 최규하, “연료전지시스템용 Push-Pull 컨버터의 손실 해석”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집 전력전자학회 논문집, 2008. 10, pp. 103~105
- [7] Wingelaar, P.J.H. Duarte, J.L. Hendrix, M.A.M “Dynamic Characteristics of PEM Fuel Cells”, IEEE PESC'05, June 16~16, 2005.
- [8] Bo Yang and Fred C. Lee. Alpha J. Zhang, Guisong huang, “LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion” Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE Volume 2, 10-14 March 2002 Page(s):1108~1112 vol.2
- [9] Rathore, A.K, Bhat, A.K.S. Oruganti, R, “A Comparison of Soft-Switched DC-DC Converters for Fuel Cell to Utility Interface Application”, Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07 2-5 April 2007 Page(s):588~594



오 은 태 (吳 恩 泰)

1982년 9월 1일생.
 2008년 단국대 전자공학과 졸업.
 2008년 명지대 대학원 전기공학과 입학.
 Tel : 031-335-6563
 Fax : 031-330-6816
 E-mail : euntaeoh@nate.com



한 병 문 (韓 炳 文)

1976년 서울대 전기공학과 졸업.
 1988년 미 아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
 미 Westinghouse 중앙연구소 선임연구원
 현재 명지대학교 전기공학과 교수
 Tel : 031-330-6366
 Fax : 031-330-6816
 E-mail : erichan@mju.ac.kr



이 준 영 (李 竣 榮)

1970년 10월 3일생.
 1993년 고려대 전기공학과 졸업.
 1996년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사).
 2001년 동 대학원 졸업(공학박).
 삼성 SDI PDP 사업부 과장
 단국대학교 전자공학과 조교수.
 현재 명지대학교 전기공학과 조교수.
 Tel : 031-330-6357
 Fax : 031-330-6816
 E-mail : pdpljy@mju.ac.kr

저 자 소 개



주 영 아 (朱 永 雅)

1986년 1월 26일생.
 2008년 명지대 전기공학과 졸업.
 2008년 동 대학원 전기공학과 입학.
 Tel : 031-335-6563
 Fax : 031-330-6816
 E-mail : younakouki@mju.ac.kr