

오프그리드용 풍력-연료전지 하이브리드 시스템 개발

최종필¹⁾, 김광수, 박내춘, 김상훈²⁾, 김병희³⁾, 유능수⁴⁾

Development of WT-FC Hybrid System for Off-Grid

Jongpil Choi, Kwangsoo Kim, Naechun Park, Sanghun Kim, Byeonghee Kim, Neungsu Yu

Abstract This paper describes the design and integration of the wind-fuel cell hybrid system. The hybrid system components included a wind turbine, an electrolyzer (for generation of H₂), a PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), hydrogen storage tank and BOP (Balance of Plant) system. The energy input is entirely provided by a wind turbine. A DC-DC converter controls the power input to the electrolyzer, which produces hydrogen and oxygen from water. The hydrogen used as the fuel for the PEMFC. Hydrogen may be produced and stored in high pressure tank by hydrogen gas booster system. Wind conditions are changing with time of day, season and year. So, wind power is a variable energy source. The main purpose with these WT-FC hybrid system is to store hydrogen by electrolysis of water when wind conditions are good and release the stored hydrogen to supply the fuel cell when wind is low.

Key words Wind turbine(풍력발전기), Proton Exchange Membrane Fuel Cell(고분자 전해질 연료전지), Electrolyzer(전기분해장치), Hybrid system(융합시스템), Balance of plant(주변장치)

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 대학원
 ■E-mail : jpgon@kangwon.ac.kr ■Tel : (033)244-8910 ■Fax : (033)257-4190

Nomenclature

V : voltage, v (DC)
 A : current, a
 P : fuel cell power, w

subscript

WT : wind turbine
 FC : fuel cell
 B.O.P : balance of plant
 MEA : membrane & electrolyte assembly

1. 서론

화석연료를 대체할 신·재생에너지에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있으며, 신·재생에너지원 중 풍력은 현재 가장 경제성이 뛰어난 청정에너지원으로 증명되고 있다. 그러나 바람은 계절, 기후 및 시간에 따라 변하므로 에너지 생산량이 일정하지 못하다는 단점을 지니고 있다. 즉 바람이 없거나 너무 강한 날에는 에너지를 생성할 수 없기 때문에 에너지 수급의 불안정성을 지니고 있다. 이러한 풍력발전의 문제

점을 극복하기 위하여 제 2,3의 에너지원과 융합된 하이브리드 형태의 발전 시스템이 요구되고 있다.⁽⁴⁻⁵⁾ 기존의 융합 시스템은 풍력과 디젤 연료를 사용한 융합 시스템이 대부분의 연구를 차지하였으나, 최근에는 청정에너지원인 수소를 이용한 연료전지와 하이브리드 발전 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁶⁻⁹⁾ 특히 대체 에너지 자원에서 고려해야 할 가장 중요한 요소인 환경과의 상용성 측면에서 수소가 가장 매력적인 에너지원이라는 평가를 받고 있다. 문제는 수소에너지의 경제성인데, 신·재생에너지원 중 가장 경제적인 풍력에너지를 이용하여 수소를 생산한다면 보다 확실한 경제적, 환경적 이득을 얻을 수 있을 것이다.

본 논문은 이러한 바람이 가지는 청정에너지원에 안정성을 부가하기 위하여 연료전지 시스템과 융합된 하이브리드 시스템을 제안하였다. 풍력발전을 통하여 생성된 여분의 전기는 물의 전기분해에 사용되어 수소를 생산하고, 생성된 수소는 저장탱크에 저장되어 전력이 필요한 순간에 연료전지에 공급되어진다. 따라서 풍력-연료전지 융합 시스템은 오프그리드용 전력 공급 장치로 보다 안정적인 전력을 공급할 수 있다는 장점을 지니게 된다.

2. 풍력발전기 및 연료전지 요소기술

2.1 풍력발전기

풍력발전기는 공기의 유동이 가진 운동에너지의 공기역학적 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시켜 전기를 얻는 시스템이다.

Fig.1은 풍력발전의 기본원리를 보여주고 있다. 풍력발전기의 주요 구성 요소로는 날개와 허브로 구성된 회전자와 회전을 증속하여 발전기를 구동시키는 증속장치, 발전기 및 각종 안전장치를 제어하는 제어장치, 유압 브레이크장치와 전력제어장치 및 지지탑으로 구성되어진다. 풍력발전은 대체에너지원으로써 커다란 역할을 수행하고 있지만 기후나 환경조건에 따라 전력의 생산량이 큰 차이를 보이기 때문에 안정적인 전력을 공급하기 어려운 실정이다.

2.2 연료전지

연료전지는 수소의 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환된

다. 특히 종래의 전지와는 다르게 외부에서 수소와 공기를 공급하는 연속적으로 전기를 생산하는 일종의 발전시스템이다.

Fig.2는 고분자 전해질 연료전지의 내부 구성도 및 전기화학 반응을 보여주고 있다. 고분자 전해질 연료전지의 발전 원리는 양극(Anode)에 공급된 수소가 촉매 상에서 수소이온(H⁺)과 전자(e⁻)로 분해된다. 분해된 수소이온은 전해질 막을 통해 음극(Cathode)으로 이동하며, 전자는 외부 전선을 통해 음극으로 이동한다. 음극에는 산소가 공급되어 양극에서 이동되어 온 전자와 수소이온과 산소가 촉매 상에서 반응하여 물을 생성한다. 고분자 전해질 연료전지는 유로(Bipolar plate), 기체확산층, 전극, 전해질 막으로 단위전지를 구성한다. 고분자 전해질 연료전지의 성능은 막전극접합체(membrane & electrolyte assembly, MEA)에 의해 크게 좌우된다. 이러한 연료전지는 발전효율 40% 이상의 고효율, 무공해, 무소음, 건설과 증설이 용이하고, 다양한 용량이 가능한 모듈화의 특징을 가지고 있다. 또한 연료전지 반응에서 생성되는 부가적인 열은 난방용으로 사용될 수도 있어 열병합 발전이 가능하여 에너지 효율을 더욱 높일 수 있다.

2.3 연료전지 BOP 및 제어시스템

연료전지 시스템을 구성하는 위해서는 스택 외에 연료와 수분 공급을 위한 공급장치, 냉각장치, 열교환기와 압축기 등의 부가 장치들이 필요하게 된다. 이러한 주변 장치들을 일반적으로 B.O.P 라고 통칭한다.

Fig.3은 연료전지 BOP 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 스택에서 생성된 전압이 낮고 전류가 높은 직류를 DC-DC 변환과 DC-AC 변환을 통한 AC전력을 생성하는 전력 변환부, 화석연료로부터 수소를 추출하는 연료개질부 등이 포함된다. 또한 가스를 공급하기 위한 동력설비부와 이를 제어하는 공정 제어부에 의해 가습, 온도, 유량 제어 등을 수행하게 된다.

2.4 전기분해장치

본 논문에서는 풍력발전을 통하여 생성된 전기를 사용하여 물을 직접 전기분해 하는 방식으로 수소를 제조한다. 전기분해 방법은 제조 기술 자체에 있어서 가장 간단하면서도 신뢰성이 높고 대량생산이 손쉬운 방법이다.

Fig.4는 물의 전기 분해 원리로 물과 접촉하는 두 전극에 직

류 전류를 흘려주면 양이온으로 전하된 수소이온이 음극으로 이동하여 수소기체로 바뀌고 비슷한 과정을 거쳐 양극에서는 산소가 생성되는 방식이다. 전극으로는 불활성인 백금과 같은 물질이 이용되는데, 부반응으로 인한 수소내의 불순물 생성을 억제하기 위한 것이다. 일반적으로 순수한 물은 전기가 잘 통하지 않아 전기분해가 이루어지지 않으므로, 보통 전기가 잘 통하는 전해질 수용액을 사용하게 되며, 1기압, 80°C 정도에서 알칼리 수용액(25~30wt% KOH)을 전해질로 사용한다.

2.5 수소저장장치

본 연구에서는 풍력에너지에 의해 제조된 수소를 부스터 시스템을 이용하여 고압으로 저장탱크에 저장되어진다.

Fig.5에 수소저장 탱크의 개략도를 보여주고 있다. 고압저장 탱크는 고에너지밀도를 위하여 적은 부피와 가벼운 무게를 요구되며, 특히 안전도가 고려되어야한다. 따라서 저장탱크는 복합재료들로 구성되어지며, 여러 안전장치들을 포함하고 있다.

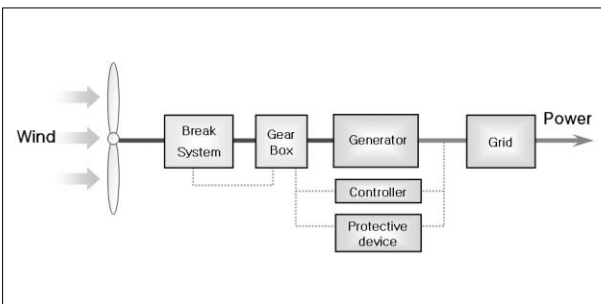


Fig 1 Principal of wind-turbine

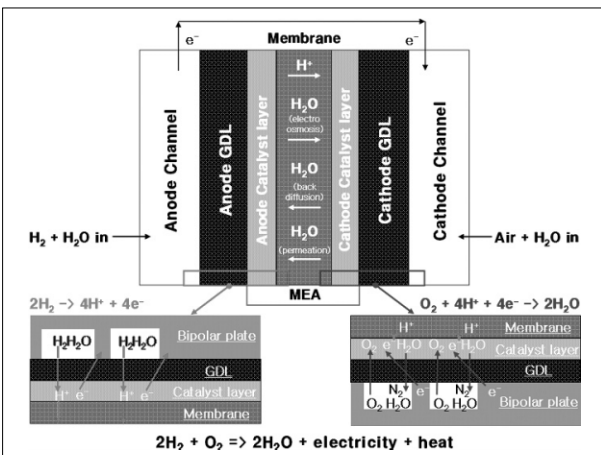


Fig 2 Schematic diagram of PEMFC

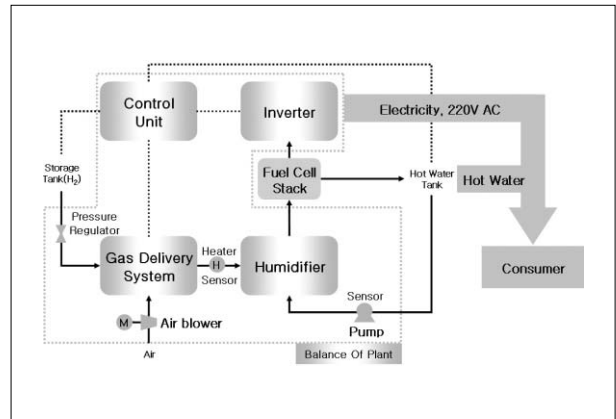


Fig 3 BOP system of fuel cell

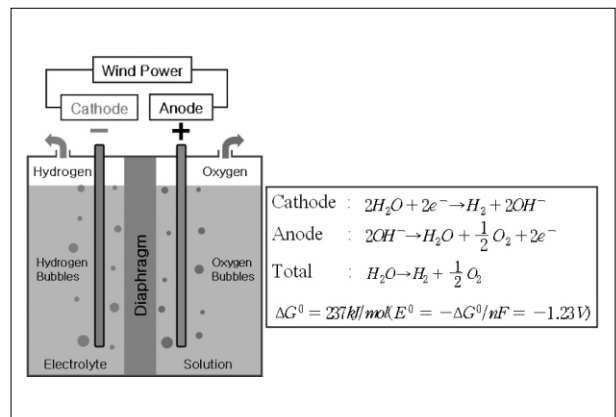


Fig 4 Principal of electrolysis

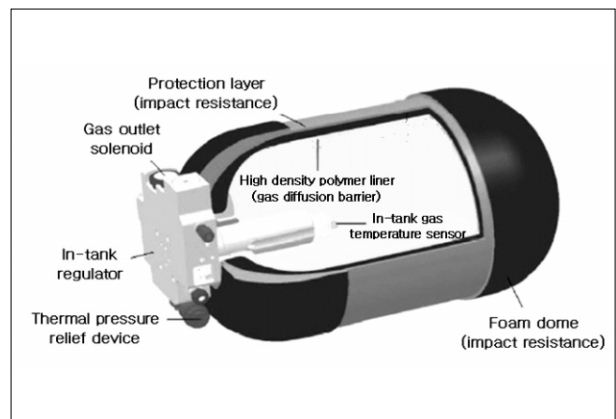


Fig 5 Schematic of hydrogen storage tank

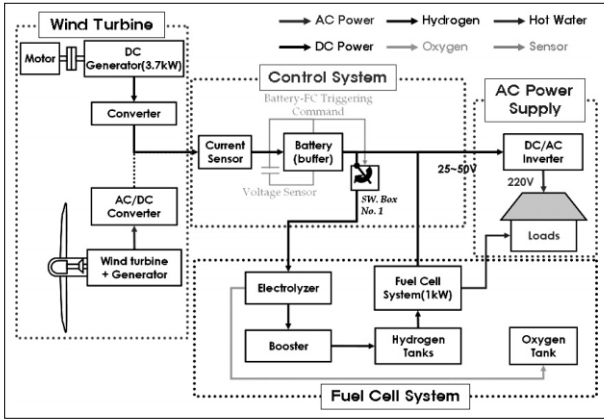


Fig.6 Architecture of WT-FC hybrid system

3. WT-FC 하이브리드 시스템 설계

Fig.6은 본 연구에서 고안된 WT-FC 하이브리드 시스템의 세부 및 통합 구성도를 보여주고 있으며, 하이브리드 시스템은 크게 풍력 시뮬레이터, 배터리 전압 및 전류 모니터링을 위한 제어 시스템, 연료전지 시스템 및 수용가 전력공급 시스템으로 구성되어진다. 이러한 통합 구성도 바탕으로 각 모듈들에 대한 사양 결정 및 Off-grid 에너지원으로 적용하기 위해 독립형 전원으로 하이브리드 시스템을 구축하였다. WT-FC 하이브리드 시스템은 풍력발전을 통해 생산된 전력을 수용가에 직접 공급하는 방식으로, 수용가에 우선적으로 전력을 공급한다. 이때, 잉여전력만을 이용하여 물의 전기분해에 사용, 연료전지 구동을 위한 수소를 생산 및 저장하는 방식으로 수용가에 안정적인 에너지 공급을 최우선시 하도록 하이브리드 시스템을 구성하였다. 따라서 배터리는 여분의 전력을 저장하는 장치가 아니며, 버퍼(buffer)의 역할만을 수행하게 되는 DC 링크 시스템(DC link system)이 된다.

이렇게 제조된 수소는 고압탱크에 저장되어지고 바람이 없거나, 너무 심하게 불어 풍력발전기를 구동시킬 수 없는 경우 연료전지로 공급되어 전력을 생산하게 된다. 따라서 풍력발전이 지니고 있는 수급 불안정의 문제를 WT-FC 하이브리드 시스템을 통하여 극복할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

4. WT-FC 하이브리드 시스템 제작

4.1 풍력 시뮬레이터

실제 풍력발전기의 경우 바람의 환경에 큰 영향을 받아 실험 및 연료전지와와의 융합과 관련된 실험에 직접 적용하기가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 시스템의 원활한 성능시험 및 융합을 위한 기초연구를 위하여 풍력발전기를 모사한 풍력 시뮬레이터의 설계 및 제작을 수행하였다. 모사된 풍력 시뮬레이터는 유도모터와 DC 발전기 그리고 DC/DC 컨버터로 구성되어진다. 유도모터와 DC 발전기를 통해 생성된 220V의 DC 전압을 DC/DC 컨버터를 통하여 48V로 변화하고 이를 DC 링크 시스템에 공급, 수용가와 전기분해 장치로 각각 전력을 공급하게 된다.

4.2 연료전지 시스템

Fig.7은 본 연구에 사용된 전기분해장치의 내구 구조를 보여주고 있다. 전해액으로 채워진 전해조의 양단에 DC 전원이 인가되면, 전해조내부의 각 극판 표면에서 수소와 산소가 발생하게 된다. 극판과 극판 사이에는 격막으로 분리되어 전해액에 포함된 이온들은 자유롭게 왕래하지만 수소와 산소 가스는 분리되어 전해액과 함께 산소 및 수소 기액분리기로 이동하게 된다. 전해액은 유동이 안정된 후에 기액분리기 하단에서 나와 전해액냉각기를 통과하면서 냉각되며, 냉각된 전해액은 순환 펌프에 의해서 다시 전해조로 공급된다. 가스는 기액분리기 상부에서 나와 가스 냉각기를 통과하면서 가스에 포함된 수분이 응축 및 냉각된다. 그 다음 응축기에서수분이 제거된 상태로 토출밸브를 통해 외부로 토출되어진다. 전기분해장치에서 나오는 수소는 건조기를 통과하면서 미세한 수분 입자나 불순물을 제거하여 고순도의 수소를 얻게 된다. 48V의 DC 전원으로 작동하며 최대 생산 가능한 수소량은 500 L/hr로 500W 연료전지를 연속 구동할 수 있는 생산량이다. 생산되어지는 수소는 0.3bar로 전기분해 장치에 장착된 건조기 내에 저장 가능하며, 저장탱크와 연결 시 바로 저장할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 전기분해에 사용되는 전해액은 KOH 수용액이며, 사용되는 물은 초순수(DI water)이다. 전기분해 장치를 통해 생성된 수소는 부스터 시스템을 통과하면서 고압으로 수소 저장탱크에 저장되어진다. 이러한 고압저장을 통하여 수소의 단위 부

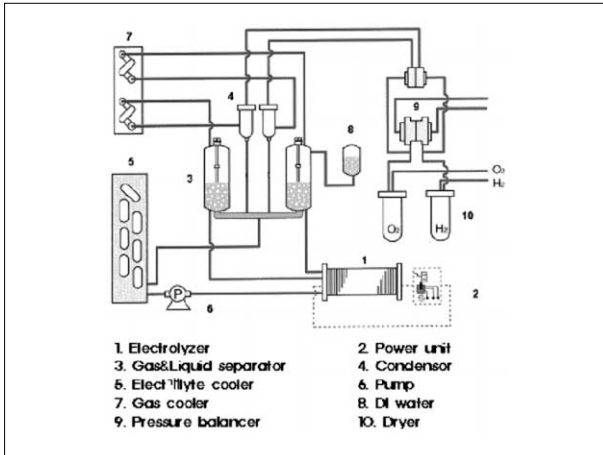


Fig 7 Structure of electrolyzer



Fig 8 1.2kW Nexa system

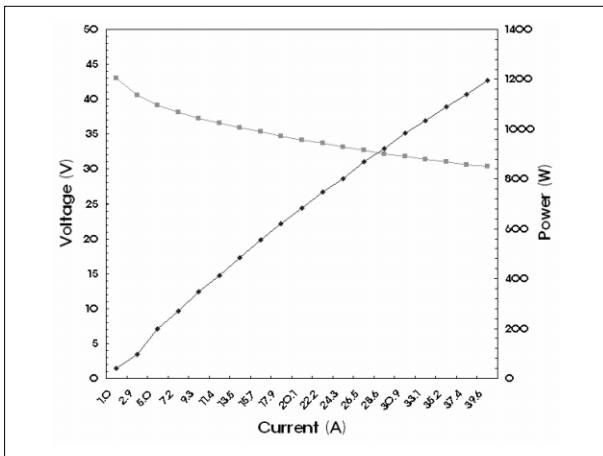


Fig 9 I-V curve of 1kW fuelcell

피당 저장량 증가를 통한 저장 효율을 높일 수 있다는 장점을 지니고 있다.

수소 저장장치로는 약 4000L의 수소 저장이 가능한 압력탱크를 사용하였으며, 이는 1kW의 연료전지를 3시간 연속 구동시킬 수 있는 용량이다.

Fig. 9는 본 연구에 사용된 발라드사의 1.2kW 스택인 Nexa 시스템을 나타내고 있다. 수소와 공기를 연료로 사용하는 고분자 전해질 연료전지로, 무가습 조건이며 공랭식 냉각방식을 사용하여 주변장치의 구성을 최소화시켰다. 유량 및 전압, 전류의 조절을 통하여 연료전지의 성능특성을 분석할 수 있으며, RS232C 통신을 통하여 모든 데이터를 전송하게 된다. Fig. 8은 이러한 Nexa 시스템의 성능곡선을 보여주고 있다. 26V, 46A에서 1.2kW의 전력을 생산하나 내부 주변장치에 의해 200W가 소비되어 1kW의 전력만을 생성하게 된다.

4.3 제어시스템

제어시스템은 풍력 시뮬레이터에 의해 생성된 전력 공급을 결정하는 부분으로 수용가로의 전력을 우선적으로 공급할 수 있도록 제작되었으며, 여분의 전력 생성 시 전기분해장치로 전력을 공급하여 수소를 생산할 수 있도록 시스템을 제어한다. 이러한 트리거링(triggering) 제어는 배터리의 전압을 체크함으로써 결정되어지며, 36V의 경계(threshold) 전압을 기준으로, 경계전압 이하에서는 스위칭 회로에 의해 전기분해장치로의 전력을 차단하게 된다.

4.4 수용가 전력공급

수용가로 전력을 공급하기 위해서는 풍력발전 및 연료전지에서 생성되는 DC 전력을 220V의 AC전력으로 변환이 필요하게 되며, 이에 따라 DC/AC 인버터가 사용되어진다.

Fig. 10은 본 연구에서 개발된 DC/AC 인버터를 보여주고 있으며, DC/DC 컨버터가 내장되어 있다. DC 25V~50V의 입력전압에 의해 AC 220V, 3kW의 최대 출력파워를 가진다.

교류 출력 220V를 제어하는 단상 인버터부와 단상 인버터의 DC link 전압을 제어하고, 입·출력간의 전기적 절연 및 고주파 인버터를 위한 DC-DC 컨버터부로 구성되어진다. 또한 낮은 입력 직류전압에 대해 전원장치의 안정된 동작을 확보하기 위해 특정 DC 전압으로 승압시키는 Boost Chopper부 그리고 제어장치 구동을 위한 제어전압 발생부와 제어부로 구성된다.

인버터의 입력부는 3개의 단자를 가지며, 좌측의 단자에는



Fig 10 Inverter system

내부에 다이오드가 직렬로 접속되어 있어 배터리 +전원과 연결되며, 중앙의 단자에는 다이오드가 연결되어 있지 않기에 연료전지의 +전원과 결선하여야 한다. 이때, 우측의 단자는 두 전원의 -측과 연결되어진다.

배터리와 연료전지의 이러한 병렬연결을 통하여 배터리에 의한 전력 공급 차단 시, 자동으로 연료전지에 의한 전력이 공급되어 수용가에 안정적인 전력을 공급할 수 있도록 시스템을 제작하였다.

4.5 WT-FC 하이브리드 시스템

Fig. 11은 본 연구를 통해 제작되어진 풍력-연료전지 하이브리드 시스템을 보여주고 있다. 풍력발전 시뮬레이터(1)에 생성된 220V의 DC 전압은 DC/DC 컨버터(2)에 의해 48V로 변환되어 버퍼(3)로 인가되어진다. 버퍼로 인가되어진 전압은 트리거링 제어(4)를 통해 인버터(5), 즉 수용가(Load)로 직접 전력이 공급되어지거나 여분의 전력 생성 시에는 전기분해장치(6)로 공급되어 수소를 생성하게 된다. 생성된 수소는 부스터(7)에 의해 저장탱크(8)에 저장되어지며 풍력발전 시뮬레이터에 의한 전력 공급이 어려울 때, 연료전지(9)에 공급, 연료전지에 의한 인버터(5) 즉 수용가로의 전력공급을 수행하게 된다.



Fig 11 WT-FC hybrid system

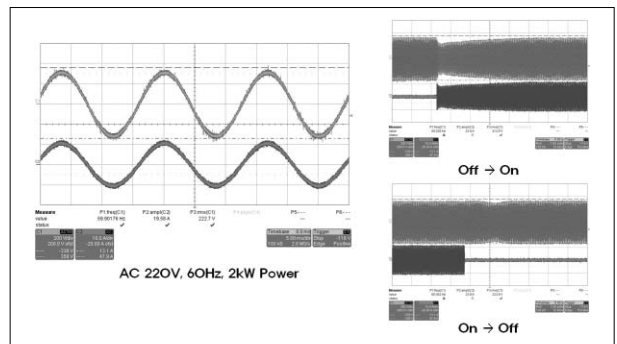


Fig 12 Inverter output waveform of WT

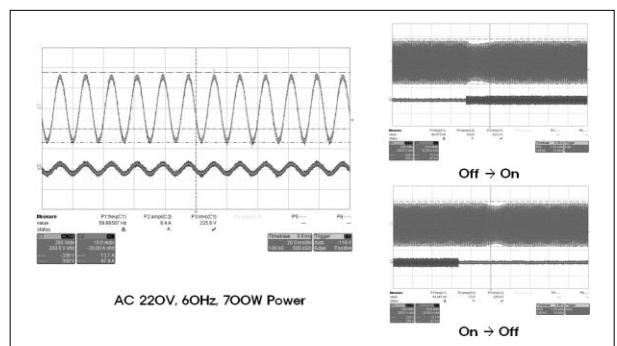


Fig 13 Inverter output waveform of FC

4.6 WT-FC 하이브리드 시스템 성능평가

제작된 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 성능평가를 위하여 풍력발전 시뮬레이터 및 연료전지에 의해 AC 220V 전력으로 파형 측정을 수행하였다. 또한 풍력전력에서 연료전지 전력으로 전환될 때의 출력파형 변화에 따른 과도응답 특성을 파악하였다.

Fig 12는 풍력 시뮬레이터에 의해 수용가로 직접 공급되어지는 전력 파형으로 2kW의 로드를 사용하여 측정하였으며, 초기 구동 시와 차단시의 과도응답 특성을 보여주고 있다. 60Hz

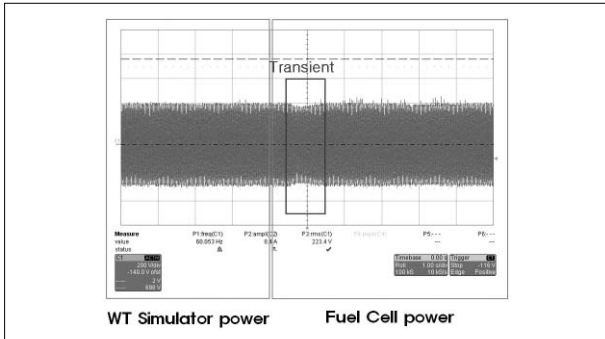


Fig 14 Inverter output waveform when mode change in power supply

의 AC 220V 출력파형이 정확하게 측정되었으며, 과도응답 특성도 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

Fig 13은 연료전지에 의해 수용가로 공급되어지는 전력 파형으로 700W의 로드를 사용하여 측정하였으며, 초기 구동 시와 차단시의 과도응답 특성을 보여주고 있다. 연료전지의 경우도 60Hz의 AC 220V 출력파형이 정확하게 측정되었으며, 과도응답 특성도 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

Fig 14는 초기 풍력 시뮬레이터의 전력 공급을 수행하다, 풍력 시뮬레이터에 의한 전력공급이 끊어졌을 때 연료전지에 의한 전력으로 전환되는 때의 출력파형 보여주고 있으며, 두 전력간의 전환 시에도 과도응답 특성이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 3kW급 WT-FC 융합 시스템의 설계 및 제작을 수행하였다. 하이브리드 시스템은 풍력 시뮬레이터, 배터리 전압 및 전류 모니터링을 위한 제어 시스템, 연료전지 시스템 및 수용가 전력공급 시스템으로 구성되어진다. 각 모듈 및 시스템에 대한 설계 및 제작이 수행되었으며, 제작된 3kW WT-FC 하이브리드 시스템의 성능 특성을 파악하였다.

후기

본 연구는 강원대학교 산학협력중심대학 기술개발과제 사업의, "수소제조용 3kW 급 풍력-연료전지 하이브리드 시스템 개

발"의 과제로 수행 중이며 "2단계 BK21"의 지원을 받습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- (1) Celik AN, 2003, "A simplified model for estimating the monthly performance of autonomous wind energy systems with battery storage", Renewable Energy, Vol. 28, pp.561-572.
- (2) Jurado F, Saenz JR, 2002, "Possibilities for biomass-based power plant and wind system integration", Energy, Vol. 27, pp. 955-966.
- (3) Badescu V, 2003, "Dynamic model of a complex system including PV cells, electric battery, electrical motor and water pump", Energy, Vol. 28, pp. 1165-1181.
- (4) El Shatter TF, Eskandar MN, el Hagry MT, 2002, "Hybrid PV/fuel cell system design and simulation", Renewable Energy, Vol. 27, pp. 479-485.
- (5) Iqbal MT, 2003, "Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system", Renewable Energy, Vol. 28, pp. 223-237.
- (6) Henrik Lund, 2005, "Large-scale integration of wind power into different energy systems", Energy, Vol. 30, pp. 2402-2412.
- (7) Jagadeesh A, 2000, "Wind energy development in Tamil Nadu and Andhra Pradesh, India Institutional dynamics and barriers-a case study", Energy Policy, Vol. 28, pp. 157-168.
- (8) Kolhe M, Agbossou K, Hamelin J, Bose TK, 2003, "Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen", Renewable Energy Vol. 28, pp. 727-742.
- (9) Burer M, Tanaka K, Favrat D, Yamada K, 2003, "Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers", Energy, Vol. 28, pp. :497-518.

최종필



2001년 강원대학교 정밀기계 공학사
2003년 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 공학석사
2007년 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 박사과정

현재 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 박사과정
(E-mail ; jpngon@kangwon.ac.kr)

김광수



2006년 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 공학사
2007년 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 석사 과정

현재 강원대학교 전기전자공학부 석사 과정
(E-mail ; 20001875@kangwon.ac.kr)

박내춘



2006년 강원대학교 전기전자공학부 공학사
2007년 강원대학교 전기전자공학부 석사 과정

현재 강원대학교 전기전자공학부 석사 과정
(E-mail ; gana007@kangwon.ac.kr)

김상훈



1987년 서울대학교 전기공학과 공학사
1989년 서울대학교 전기공학과 공학석사
1994년 서울대학교 전기공학과 공학박사

현재 강원대학교 전기전자공학부 부교수
(E-mail ; kshoon@kangwon.ac.kr)

김병희



1998년 서울대학교 기계설계공학과 공학사
1990년 서울대학교 기계설계공학과 공학석사
1994년 서울대학교 기계설계공학과 공학박사
1998년 Univ. of Michigan 기계공학과 박사 후과정

현재 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수
(E-mail ; kbh@kangwon.ac.kr)

유능수



1976년 연세대학교 기계공학과 공학사
1978년 연세대학교 기계공학과 공학석사
1982년 Univ. of Poitiers 항공기계공학 공학박사

현재 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수
(E-mail ; yooneso@kangwon.ac.kr)