

로봇용 연료전지 이차전지 하이브리드 시스템 연구

권오성*, 이상철*, 이상우**, 이동하*

*대구경북과학기술원 로봇시스템연구부(ok235@dgist.ac.kr, sclee@dgist.ac.kr, dhlee@dgist.ac.kr),
**대구경북과학기술원 차세대융복합연구센터(swlee77@dgist.ac.kr)

The study of proton exchange membrane fuel cell and Li-poly battery hybrid system

O-sung Kwon* Sang-cheol Lee* Sang-woo Lee** Dong-ha Lee*

*Division of Robotics System, DGIST(ok235@dgist.ac.kr, sclee@dgist.ac.kr, dhlee@dgist.ac.kr),
**Advanced Convergence Research Center, DGIST(swlee77@dgist.ac.kr),

Abstract

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is the most promising energy source for the robot applications because it has unique advantages such as high energy density, no power drop during operating, and easy to make compact size. However, PEMFC has intrinsic disadvantages which are delay to start up and difficulty to correspond drastic load changes. These disadvantages can be compensated by hybrid operating with a Li-poly battery. This study is focus to build and understand the hybrid system for the robot system. In this study, we build the PEMFC hybrid system using EOS-320 PEMFC stack, Li-poly battery and G-Philos FDX1-250BU dc-dc converter. The hybrid system is accurately monitored by CAN and RS485. The system was studied under two conditions such as non-loaded and loaded operating conditions. The results show that the system has delay to start up without hybrid operating and it can be compensated with the hybrid operating.

Keywords : 연료전지 이차전지 하이브리드 시스템(PEMFC Li-Poly Hybrid System), 고분자 박막 연료전지(PEMFC), 하이브리드(Hybrid), DC/DC 컨버터(DC/DC Converter)

1. 서 론

적절한 에너지를 선택하는 것은 로봇 구동에 있어서 아주 중요한 요소이다. 로봇은 그 목적(정찰, 재해 감시 등)에 따라 정지, 가속

등의 다양한 형태의 주행을 할 수 있어야 하며 또한 목적에 따른 구동 시간을 만족 시켜야 한다. 이러한 이유로 인하여 로봇 구동용 에너지원은 빠른 로봇 구동과 로봇 구동 시 급격한 부하의 변화를 만족시켜야 한다.

고분자 박막 연료전지는 화학에너지를 중간의 변환과정 없이 바로 전기적 에너지로 변환하는 장치이다. 이러한 에너지 변환과정은 일반 내연기관에 비해 높은 에너지 변환율을 보여준다. 또한 내연기관이나 열기관의 생성물이 이산화탄소(CO₂)나 환경적으로 유해한 기체인 반면 연료전지의 경우 반응물은 일반적인 물(H₂O)로 환경적으로 무해하다. [1-2] 또한 연료전지는 수소 연료(H₂)가 지속적으로 제공되는 한 거의 동일한 성능을 보여준다. 고체인 고분자 박막을 전해질로 사용함으로써 크기나 모양을 원하는 형태로 성형을 할 수 있다. 이러한 연료전지의 장점들은 로봇용 에너지원으로 적합하다는 것을 보여준다. 그러나 연료전지가 가진 여러 장점에도 불구하고 연료전지는 로봇용으로의 응용에 여전히 많은 문제점들을 가지고 있다. 연료전지는 그 구조적인 문제로 인하여 시동 시 부하에 즉각적으로 전력을 제공할 수 없고 또한 급격한 부하의 변화에 대응하기 어려운 과도상태 응답현상(transient response)을 보인다. [3]

이러한 연료전지의 단점들은 하이브리드 시스템 구축에 의하여 보완 가능하다. 이러한 이유로 연료전지의 응용에 있어서 하이브리드는 시스템의 구성은 필수적으로 고려되어야 한다. [4, 5]

본 연구에서는 연료전지와 리튬 폴리머 이차전지 그리고 DC/DC 컨버터를 이용하여 로봇용 하이브리드 시스템을 설계 구성하였다. CAN 통신과 RS485 통신을 통해 하이브리드 운전 시 시스템의 각 부분의 변화를 모니터링하고 하이브리드 시스템 운전을 이해하였다.

2. 로봇구동용 연료전지 & 이차전지 하이브리드 전원시스템

2.1 하이브리드 시스템 구성

연료전지의 하이브리드 시스템 구성은 대개의 경우 연료전지와 이차전지 그리고 전력

의 흐름을 조정하는 컨버터로 구성된다. 본 실험에서 하이브리드 시스템은 Fig 1과 같이 연료전지 스택, 리튬폴리머 전지, DC/DC 컨버터의 세 부분으로 구성되어 있다.

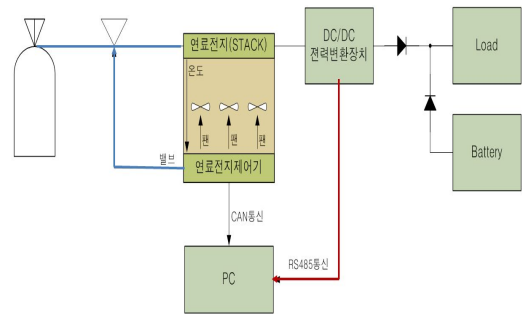


Fig 1. PEMFC and Li-poly battery hybrid system

첫 번째로 시스템의 주전원이 되는 연료전지 스택이 있다. 연료전지 스택은 Pearl Hydrogen사의 EOS-320이 사용되었다.

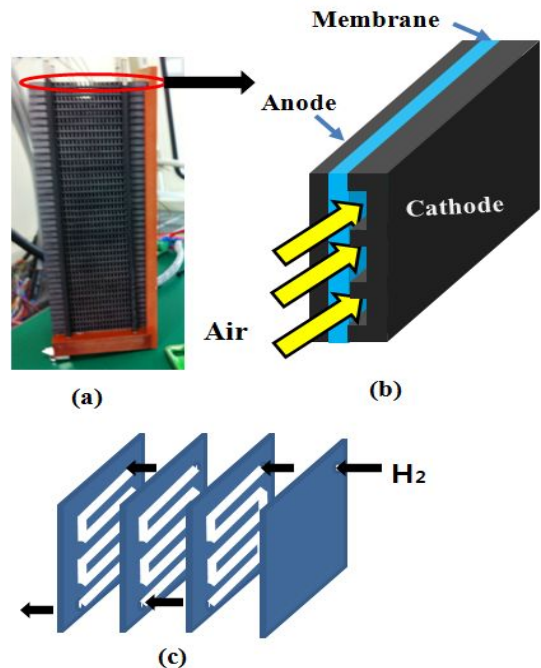


Fig 2. EOS-320 fuel cell (a) stack (b) air supply(cathode) and (C) H2 supply(anode)

EOS-320은 40장의 단위전지로 구성되어 있으며 산소를 별도의 산소 공급 장치 없이 대기 중의 공기를 직접 캐소드에 공급하는 오픈 캐소드의 형태의 연료전지 이다. 이러한 오픈 캐소드 형태의 연료전지는 클로즈드 형태의 연료전지에 비해 효율은 상대적으로 떨어지나 BOP의 구조가 간단해짐으로서 이동용이나 소형연료전지의 구성에 장점을 가진다. [6] 산소의 공급량 외부에 부착 된 팬을 통하여 조정된다. 수소는 애노드 쪽과 연결된 수소 탱크로부터 약 0.5 bar의 압력으로 분당 4 리터 정도가 균일 하게 공급된다. Fig 2는 EOS-320의 구조와 반응물 (수소, 공기)의 공급을 보여 준다. 연료전지 동작 시 생성되는 열은 외부의 팬에 의해 약 15°C-30°C 로 관리 된다.

하이브리드 시스템의 두 번째 구성요소는 이차전지이다. 이차전지는 Kokam 사의 리튬 폴리머 전지가 사용되며 3600mAh의 에너지를 가진다. 마지막으로 연료전지 이차전지 하이브리드 시스템의 핵심이라고 할 수 있는 DC/DC 컨버터가 있다. DC/DC 컨버터는 각 전원으로부터 제공된 전력을 상황에 따라 조절한다. DC/DC 컨버터의 동작은 RS485를 통해 모니터링 된다. 각 부분의 자세한 사양은 Table 1에 기술되어 있다.

Table 1. Hybrid system specification

| Fuel Cell (EOS-320) | DC/DC 컨버터 (FCBCS260) | Battery (리튬폴리머) |
|---|---|---|
| Power: 320W Voltage: 24V Current: 14.6A 효율: 50%이상 Size(mm): 236X84X138 Weight: 2760g 동작온도: 5°C-40°C Relative Humidity: 10%-95% | Input Power: 280W Input Voltage: 24V Input Current: 11.6A output Power: 250W output Voltage: 23V output Current: 10.9A Efficiency: 90%이상 Size(mm): 150X105 Weight: 186g | Capacity: 3600 mAh Rated voltage: 22.2V Discharge Current: 108A Size (mm): 155.5X44X51 Weight: 653g |

2.2 DC/DC 컨버터

연료전지 이차전지 하이브리드는 로봇이 요구하는 빠른 시동 그리고 급격한 부하의 변화에 대응할 수 있다. 이러한 하이브리드의 핵심은 전력변환이라고 할 수 있다. 빠른 시동을 위해 우선 이차 전지에서 부하로 전력을 공급하여 시동을 하고 정속 운전 중에는 연료전지를 통하여 전력을 공급하고 전력을 소비한 이차전지를 충전하며 연료전지가 공급할 수 있는 전력 이상이 요구 될 경우 이차전지로부터 공급한다. 이렇게 연료전지와 이차전지로부터의 다양한 형태로 제공되는 전력은 부하에 필요한 형태의 전력으로 변환 되어 제공 되어져야 한다. 이러한 이유로 효율적인 DC/DC 컨버터의 사용은 연료전지 이차전지 하이브리드 구성에 있어서 필수적이라고 할 수 있다.

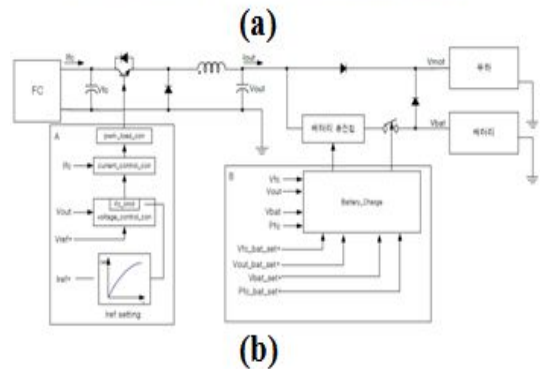
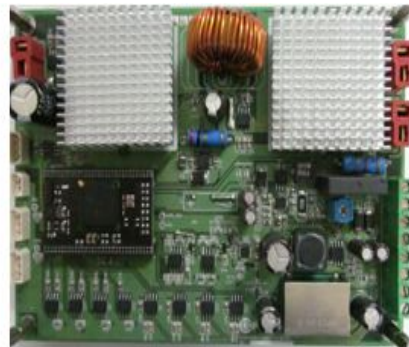


Fig 3. FCBCS260 DC/DC converter

(a) Real image of the converter

(b) schematic diagram of the converter

Fig 3는 연료전지 이차전지 하이브리드를 위해 개발된 FCBS260 DC/DC 컨버터를 보여준다. FCBS260은 약 90% 이상의 전력 변환 효율을 보여준다. DC/DC 컨버터의 이상적인 변환 효율은 100%이나 일반적인 컨버터의 전력변환 효율은 75%-95% 사이를 보여준다. 이러한 사실을 고려할 때 FCBS260은 적절한 전력변환 효율을 보여준다고 할 수 있다.

FCBS260은 MOSFET과 LC로 구성된 전형적인 강압형 컨버터의 형태를 보여준다. FCBS260에서 pulse with modulation (PWM)을 통하여 16.6 μ s의 주기로 전압을 제어한다. DC/DC 컨버터로 연료전지로 부터의 입력전압이 24V이고 DC/DC 컨버터의 출력전압은 23V이다. 시비율 D(스위치 on 시간/스위칭 주기)는 약 0.958이다.

Fig 4은 DC/DC 컨버터를 통한 PEMFC 이차전지 하이브리드 전력의 흐름을 보여준다. 검은색 된 연결은 전력이 공급 되지 않음을 나타내며 빨간색이나 하늘색의 연결은 전력의 공급을 나타낸다. DC/DC 컨버터를 통한 연료전지 이차전지 하이브리드 운전은 세 가지 모드로 이루어진다. 첫 번째 모드는 Fig 4 (a)에서와 같이 이차전지에서 부하로의 전력 공급이다. 시스템 시동 시 먼저 이차전지로 부터의 전력이 DC/DC 컨버터를 통하여 부하로 공급된다. 이 경우 이차전지의 특성인 트랜지언트 현상이 없이 부하로 즉시 전력을 공급하므로 빠른 시동을 가능케 한다.

두 번째 모드는 Fig 4 (b)에서와 같이 이차전지를 통해서 부하로 전력을 공급하지 않고 오직 연료전지만을 통하여 부하에 전력을 공급하는 것이다. 시스템이 급격한 부하의 변화를 요구하지 않으며 오직 정상상태의 전력을 요구 할 경우에 DC/DC 컨버터는 두 번째 모드로 동작한다. 이 모드에서는 연료전지의 연료량이 충분한 경우 전력의 강하 없이 거의 일정한 전력을 부하로 공급한다.

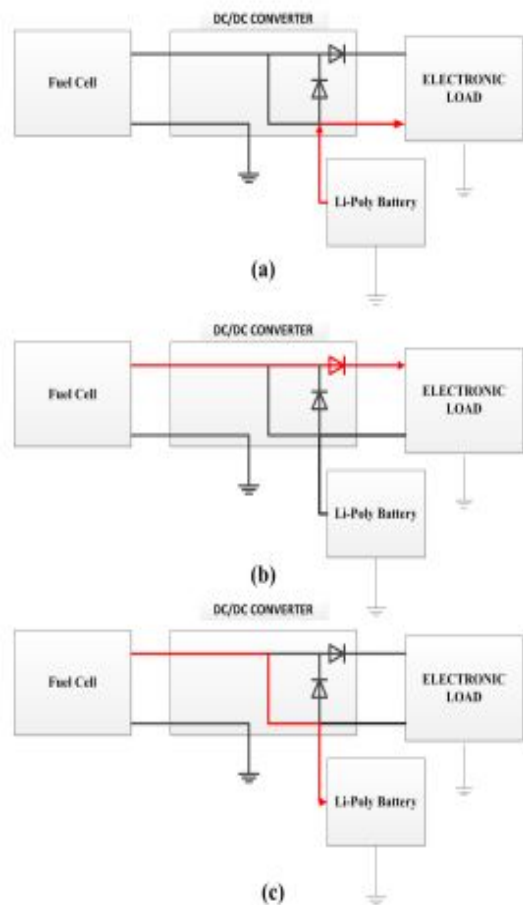


Fig 4. Block diagram of the power flow of the hybrid system

세 번째 모드는 Fig 4 (c)와 같이 연료전지로부터 이차전지로 전력을 공급하는 경우이다. 이차전지의 충전량이 충분하지 못 할 경우에 동작한다. 이차전지 충전 조건은 이차전지, DC/DC 컨버터, 연료전지의 출력과 전압과 전력을 고려하여 정해진다. 이차전지 전압이 15V-21V 사이이고, DC/DC 컨버터 출력 전압이 21-22.5V 사이이고, 연료전지 출력전압이 25V 이상이며, 연료전지 출력전력이 250W 이하 일 경우 동작한다.

Fig 5 (a)는 하이브리드 운전에서의 연료전지와 이차전지의 부하에 따른 전력 공급을 나타내는 가상의 그래프이다.

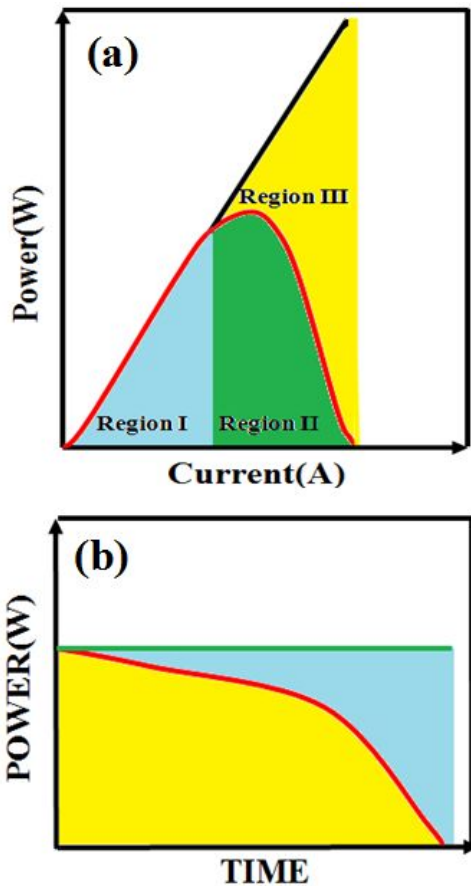


Fig 5. Power characteristics
 (a) fuel cell power characteristic by electrical load and
 (b) Li-poly battery power characteristic by time

Fig 5 (a)는 연료전지 부하에 따른 전력 변화 (붉은 선)와 부하에 따른 이상적인 전력공급(검은 선)을 나타낸다. Fig 5 (a)에서 전체 요구 부하의 범위로 볼 때 연료전지가 공급할 수 있는 전력은 단지 Region I으로 한정지어짐을 보여준다. 만약 부하에서 Region II는 Region III 만큼의 전력을 요구할 경우 연료전지가 아닌 보조 전원 즉, 이차전지로부터 전력이 공급 되어야 한다. Fig 5 (b)는 이차전지의 시간에 따른 전력의 감소(붉은선)과 시간에 따른 이상적인 전력 공급(녹색선)을 나타낸다. 이차전지는 일정한 부하 영역에서 시간에 따라 점차 감소함을 보여 준다. 이차전지

로 부하로 제공 할 수 있는 에너지의 양은 붉은 선 및의 노란색 영역 만큼이다. 이상적인 경우를 가정하면 하늘 색 영역 만큼의 에너지량이 부족 하다고 할 수 있다. 이상적인 하이브리드 시스템에서는 하늘 색 만큼의 에너지가 이차전지가 아닌 다른 에너지원 즉 연료전지로부터 공급 되어야 한다.

위에서 설명 된 바와 같이 연료전지는 이차전지에 비해 제공 할 수 있는 전력의 영역이 작다. 그러나 연료전지는 이차전지에 비해 제공 할 수 있는 에너지의 양은 상대적으로 많다. 이러한 관점에서 연료전지와 이차전지는 단독으로 사용되기 보다 하이브리드로 사용될 경우 서로의 단점을 보완 하여 최적의 전력을 부하로 제공한다고 볼 수 있다.

3. 하이브리드 시스템 구동 결과

Fig 6는 연료전지 하이브리드 시스템의 시동에 따른 연료전지 출력전류 전압과 부하 전류 전압의 변화이다. 파란색 선과 녹색 선은 각각 부하전압과 부하 전류를 나타낸다. 노란색 선과 빨간 색 선은 각각 연료전지 출력전압과 출력전류를 나타낸다. 시동과 동시 5A의 부하를 시스템에 걸어 주었다. 그 경우 부하전압은 약 0.7V 하강한 후 서서히 22.6V로 변한다. 전압 강하는 다이오드의 저항에 의한 것으로 추정된다. 연료전지의 출력전력(출력전압X출력전류)은 약 40초 동안 117.82W 까지 서서히 증가하다 안정화 된다. 이러한 연료전지 출력전력의 증가는 트랜지언트 현상으로 이해 될 수 있다. 부하에서는 다이오드에 의한 전력강하를 제외 한다면 전력이 일정하게 유지 되는 것을 보여준다. 시동 후 약 40초 동안의 전력은 이차전지로부터 DC/DC 컨버터에 의하여 부하에 전력이 제공되고 그 이후 연료전지로부터 부하에 전력이 제공된다. 이러한 결과는 하이브리드 운전에 의하여 연료전지의 시동 시 나타나는 트랜지언트 현상이 보상됨을 나타낸다.

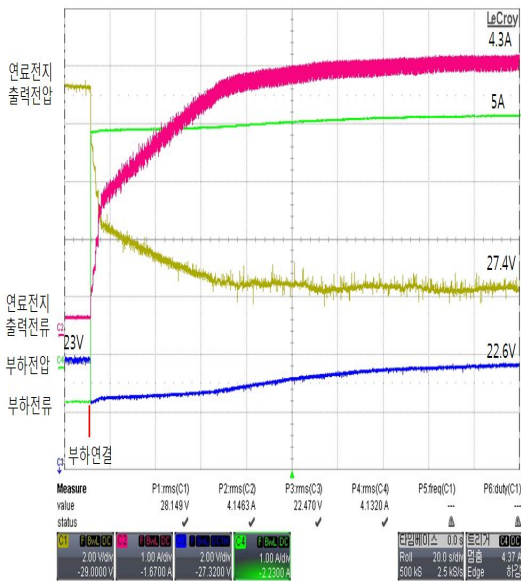


Fig 6. Load operation of hybrid system

Fig 7는 하이브리드 운전 시 부하의 변화에 따른 전압과 전력의 변화를 보여 준다. 붉은 선과 검은 선은 전압과 전력 변화의 경향을 보여주는 guide line 이다. 전압과 전력의 plot 은 연료전지와 이차전지의 전류에 따른 변화를 포함한다. DC/DC 컨버터로 제공되는 연료전지의 전압이 부하에 의해 감소하여 약 22V 이하로 떨어질 경우 부하로 제공 되는 전력은 이차전지가 담당한다. 그 결과 0A부터 4A의 부하에 대하여서는 연료전지가 전압과 전력을 공급한다. 그리고 5A부터 10A 까지의 부하에 대해서는 이차전지가 전력과 전압을 공급한다.

전력-전류 그래프는 일반적인 연료전지의 전압-전류 그래프와는 다른 형태를 보여준다. 일반적으로 연료전지에서의 전력-전류 그래프는 비선형 적으로 증가하다 피크 값을 가진 후 급격히 감소하나 이 실험에서는 전류에 따라 전력이 증가함을 보여 준다. 이유는 전력-전류 그래프가 연료전지와 이차전지의 전력변화를 포함하기 때문이다. 전압-전류 그래프에서 Fig 8과 같이 5A를 기준으로 5A

이전에는 연료전지의 전력변화를 보여주며 이후의 변화량은 이차전지의 전력을 보여준다. Fig 7은 연료전지와 이차전지의 전력-전압의 변화율을 보여주기 위해 연료전지와 이차전지의 구간에 대하여 각각 피팅을 하였다. 이 결과 증가율이 연료전지의 경우 21.93 W/A이고 이차전지의 경우 19.79 W/A로 약 10% 정도 차이를 보인다.

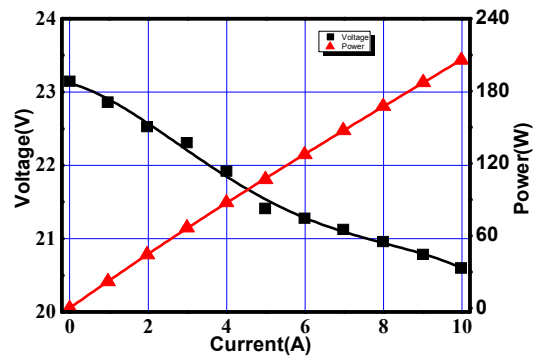


Fig 7. Power-electrical load graph of hybrid system

Fig 5 (a)에서와 같이 연료전지 이차전지 하이브리드 시스템은 부하의 요구에 대하여 Region I (0A-4A)은 연료전지로부터 공급되며 Region II와 Region III (5A-10A)는 이차전지로부터 공급된다. 하이브리드에 통한 이차전지로부터 적절한 전력의 부하로의 제공은 연료전지의 한계를 보완함을 보여준다..

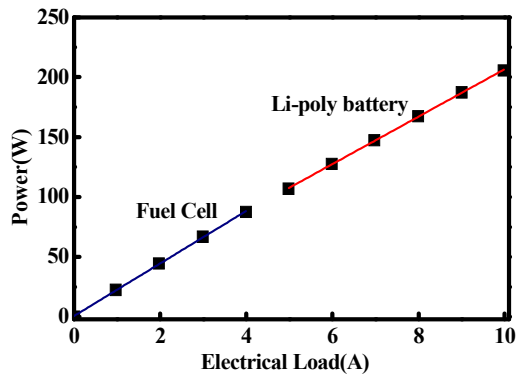


Fig 8. Power variation of fuel cell and Li-poly battery

5. 결 론

이 연구에서 연료전지 와 이차전지 하이브리드 시스템을 구축하였다. 또한 하이브리드 시스템을 운전을 위한 고효율 DC/DC 컨버터를 설계 제작하였다. 연료전지 운전 시 문제가 되는 트랜지언트 현상이나 불균일한 출력 전력에 대한 응답을 DC/DC 컨버터를 통한 연료전지와 이차전지의 하이브리드 운전으로 인하여 개선됨을 보였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술부에서 일반사업에 의해 수행되었습니다(12-BD-0102).

참 고 문 헌

1. Wee, J. H. Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, (2007), 1720-1738.
2. Santarelli, M. G., and Torchio, M. F. Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC. *Energy Conversion and Management* 48, (2007), 40-45.
3. Jarvis, L. P., Cygan, P. J., and Roberts, M. P. Fuel Cell/Lithium Ion Battery Hybrid For Manportable Applications. *Battery Conference on Applications and Advances, 2002*. The Seventeenth Annual, (2002) 69-72.
4. Fauteux, D., Massucco, A., Mclin, M. van Buren, M., and Shi, J. Lithium polymer electrolyte rechargeable battery. *Electrochimica* 40, (1995) 2185-2190.
5. Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., and Wan, Z.

Experimental investigation on the dynamic performance of hybrid PEM fuel cell/battery system for lightweight electric vehicle application. *Applied Energy* 88, (2011), 68-76.

6. Bussayajam, N., Hanl, M., Kwanl, K. H., Wan, S., and Chan, S. H. Planar air breathing PEMFC with self-humidifying MEA and open-cathode geometry design for portable applications. *SIMTech technical reports (STR_V11_N2_03_MTG)* 11, (2011), 66-69.