

< 논문 >

고분자 전해질 연료전지와 슈퍼캐패시터 하이브리드 시스템의 운전 전략에 관한 연구

박광진* · 지현진* · 배중면†

(2006년 2월 16일 접수, 2006년 6월 7일 심사완료)

Study of Operation Strategy for Hybrid PEM Fuel Cell and Supercapacitor

Kwangjin Park, Hyunjin Ji and Joongmyeon Bae

Key Words : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Supercapacitor(슈퍼캐패시터), Operation Strategy(운전전략), Water Problem(물문제), DC/DC Converter(직류변환기)

Abstract

PEMFC has several technical problems such as water management, long term stability and performance degradation as. PEMFC has been studied not only to solve water management, but also to generate power in stable manner to system by using a hybrid system with auxiliary energy storage device. The purpose of this study is to couple PEMFC with supercapacitor to make a hybrid system and to design and test control strategies for stable power generation in case of changing output power. The polarization curve and dynamic behaviors while changing power were investigated to find out characteristics of PEMFC stack. A DC/DC converter was fabricated in order to increase fuel cell and supercapacitor voltage and to charge supercapacitor. We found that the operation strategy 2 was recommended to the system because of solving water management problem and increasing the dynamic behavior.

기호설명

PEMFC : 고분자 전해질 연료전지

E_{Nernst} : 열역학적 전압[V]

V_{FC} : 연료전지 전압[V]

V_{act} : 활성화 분극 손실[V]

V_{ohmic} : 저항손실[V]

T : 온도[K]

F : Faraday 상수[96485 C/mole]

R : 기체 상수[J/mole·K]

C_{O_2} : 산소 농도[mole/cm³]

i_{FC} : 연료전지 작동 전류[A]

R_M : 전해질 저항[Ω]

R_C : 활성화 분극 저항

C : 등가 캐패시턴스[F]

\dot{m}_{H_2} : 수소유량[kg/s]

\dot{m}_{O_2} : 산소유량[kg/s]

V_s : 슈퍼캐패시터 전압[V]

I_s : 슈퍼캐패시터 전류[A]

BUS : 시스템 전력 전달 선

I_{in} : 입구

I_{out} : 출구

$Diff$: 확산되는 양

1. 서론

고분자 전해질 연료전지는 다른 형태의 연료전지에 비하여 낮은 작동 온도, 높은 효율 및 전류 밀도, 그리고 쉬운 제작 등의 장점을 가지고 있

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : jmbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3045 FAX : (042)869-8207

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

다.⁽¹⁾ 이러한 장점에 반하여, 물 문제, 불안정한 장기 운전 특성, 그리고 성능 저하의 기술적인 문제를 가지고 있다. 기술적인 문제는 대부분 물 문제와 연관되어 있다.⁽²⁾ 물 문제를 해결하기 위해서 연료전지를 100°C 이상에서 운전하거나, 유로 형상의 디자인을 통하여 해결하려는 선행 연구가 많이 진행 중이다.^(3,4) 하지만, 최근에는 연료전지와 다른 에너지 저장 장치를 이용한 하이브리드 시스템을 이용하여 물 문제뿐만 아니라 연료전지의 동특성 저하를 함께 해결하려는 연구도 많이 진행 중에 있다.⁽⁵⁾ 특히 요구 전력이 연속적으로 변하는 연료전지 자동차의 경우 하이브리드 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 연료전지와 슈퍼캐패시터 하이브리드 시스템을 구성하여 급격한 부하 변동 및 큰 부하가 요구될 때 요구 전력을 안정적으로 공급할 수 있고, 연료전지에서 발생하는 물 문제 및 동특성 저하를 운전전략을 통하여 줄여보고자 한다.

2. 실험 및 모델링

2.1 실험 장치

본 하이브리드 시스템 실험을 위한 실험 장치는 연료전지 구동을 위한 부분, 슈퍼캐패시터, 그리고 DC/DC Converter 로 구성되어 있다.

2.1.1 연료전지

Fig. 1 은 연료전지 구동을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험 장치는 크게 연료전지, 연료와 공기의 공급 장치, 그리고 냉각 장치로 구성되어 있다. 연료전지는 Cool-FC 사의 Pro-FC7 모델로 50cm²의 활성면적(Active area)을 가진 고분자 전해질 연료전지 7 장으로 구성되어 있다. 순도 99.9%의 수소 가스가 연료극(Anode)으로 공급되고, 공기극(Cathode)에는 공기를 공급하였다. 퍼징을 하기 위해 실험 전과 후에 질소를 3 분간 스택에 흘렸다. 스택으로 공급되는 모든 가스는 정확하게 하기 위해서 GMC 1000 으로 제어되는 MFC 를 이용하였다. MFC 는 실험 전에 모두 보정하여 정확한 양을 공급할 수 있게 하였다. 각각의 MFC 앞에는 체크 밸브를 달아 가스의 역류를 방지하였고, 각 가스의 출구에 압력 조절기(Back pressure regulator)를 장착하여 채널내의 압력을 연료극은 1.5atm 공기극은 1.7atm 으로 일정

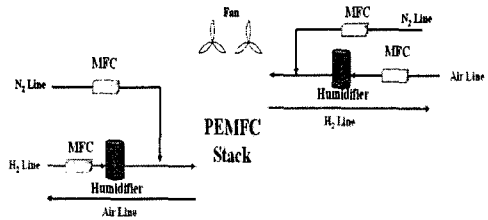


Fig. 1 Schematic description of the system of the fuel cell stack and some components

하게 조절하였다. 연료전지로 공급되는 가스는 모두 Bubbler 형태의 가습기(Humidifier)를 이용하여 가습하였다. 가습기 안의 물은 탈 이온수(De-ionized water)를 사용하였다. 그리고 가습기를 통과한 가스의 응축을 방지하기 위해서 가스 라인에 단열을 하였다. 실험에 사용된 연료전지의 용량이 작기 때문에 물 펌프 대신 팬을 이용하여 스택의 온도를 유지 하였다. 연료전지 내부에 Thermocouple 을 장착하여 연료전지의 온도를 실시간으로 측정하고 일정 온도 이상일 경우 팬을 작동 시켜 냉각을 하였다.

2.1.2 슈퍼캐패시터

슈퍼캐패시터는 전극과 전해질 사이에 형성되는 전기이중층(electrochemical double-layer)에 의해 작동되는 에너지 저장 장치로 큰 부하가 시스템에 인가되었을 때 전력 분담을 위해 사용되었다. 본 연구에서는 Nesscap 사의 400F 용량의 슈퍼캐패시터를 병렬로 2 개 직렬로 3 개씩 연결하여 227F 7.5V 가 되도록 제작하였다. 이 용량은 슈퍼캐패시터가 7.5V 로 충전되었을 경우 약 20A 의 전류를 20 초간 방출할 수 있는 용량으로 BUS 에 5A 이상의 고전류가 부가 되었을 때 전력을 담당할 수 있게 된다.

2.1.3 DC/DC Converter

DC/DC Converter 는 연료전지와 슈퍼캐패시터에서 나오는 전압을 승압하여 12V 의 일정한 전압이 출력되도록 하는 기능을 가진 Boost 와 연료전지의 잉여 전력을 슈퍼캐패시터로 보내 충전하는 기능을 담당하는 Buck 으로 구성되어 있다.⁽⁷⁾ Fig. 2 는 DC/DC Converter 의 개략도를 나타낸다. 본 연구에서는 양방향 DC/DC Converter 중 Synchronous DC/DC Converter 를 사용하였다. Synchronous DC/DC Converter 는 가장 간단한 양방향 DC/DC Converter 이기 때문에 쉽고 저렴한 가격으로 제작이 가능하다. 또한, 스위치에 흐르는 전류가 작기

때문에 효율 증대와 함께 스위치의 온도 상승문제도 어느 정도 해결이 가능한 장점을 가지고 있어 Synchronous DC/DC Converter 를 사용하게 되었다. TL494 칩에서 발생된 PWM (Pulse Width Modulation)신호를 이용하여 스위치(Switch)를 제어함으로써 전력 전달이 양방향으로 가능한 DC/DC Converter 를 제작할 수 있다. BUS 는 연료전지와 슈퍼캐패시터가 DC/DC Converter 를 통하여 승압된 최종 출력 전압을 나타내고 전압 값은 12V 이다. DC/DC Converter 의 duty ratio 를 고려할 때 연료전지 및 슈퍼캐패시터의 전압이 4V 이상이 되어야만 BUS 전압을 12V 로 유지할 수 있다. 아래 Fig. 3 은 본 실험을 위해 제작된 연료전지와 슈퍼캐패시터에 사용되는 DC/DC Converter 의 출력에 대한 효율 곡선을 나타낸다.

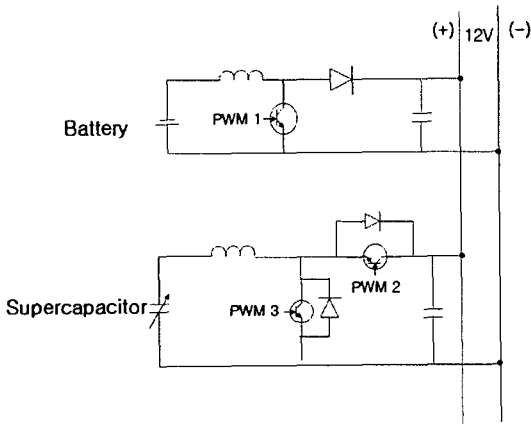


Fig. 2 Schematic description of DC/DC Converter

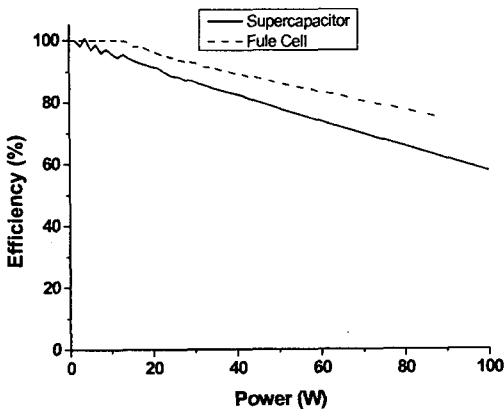


Fig. 3 Efficiency of DC/DC converter for fuel cell and supercapacitor

2.2 모델링

Fig. 4 은 연료전지와 슈퍼캐패시터 하이브리드 시스템의 MATLAB/Simulink™ 을 이용한 블록 다이어그램을 나타낸다.

2.2.1 연료전지

연료전지의 모델링은 열역학적으로 표현되는 OCV 의 전압과 비가역 손실인 Ohmic loss, Activation loss, Concentration loss 로 표현되는 전압으로 아래와 같이 표현할 수 있다.⁽⁶⁾

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (1)$$

Nernst 방정식은 열역학 적으로 나타낼 수 있는 연료전지의 전압으로 OCV(Open Circuit Voltage)를 나타내며 아래와 같이 표현된다.⁽⁶⁾

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta H}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} \cdot T + \frac{RT}{2F} \cdot [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (2)$$

Tafel 방정식으로부터 유도된 Vact 는 연료극과 공기극의 Activation over potential 을 나타내며 아래와 같이 표현할 수 있다.⁽⁶⁾

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(i_{FC})] \quad (3)$$

Vohmic 는 저항 성분에 의한 전압 강하를 나타낸다. 저항은 전해질의 저항, 그리고 NAFION 을 통하여 수소이온의 이동에 따른 저항으로 나타나고 아래와 같이 표현할 수 있다.⁽⁴⁾

$$V_{ohmic} = i_{FC} \cdot (R_M + R_C) \quad (4)$$

Vcon 는 가스의 물질 전달 문제로 인한 전압 강하를 나타내며 아래와 같이 표현할 수 있다.⁽⁴⁾

$$V_{con} = -B \cdot \ln(1 - \frac{J}{J_{max}}) \quad (5)$$

전해질에서의 Charge double layer 로 인하여 발생되

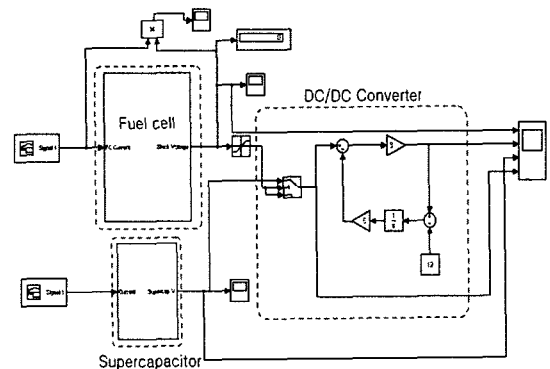


Fig. 4 Block diagram of hybrid system model in MATLAB/Simulink™

는 동특성을 표현하기 위해서 캐패시턴스와 저항의 등가회로로 표현할 수 있다. 따라서 Charge double layer 와 관련된 식은 아래와 같다.⁽⁴⁾

$$\frac{dV_{act}}{dt} = \frac{i_{FC}}{C} - \frac{V_{act}}{R_a \cdot C} \quad (6)$$

수소가 연료극의 전극으로 확산되어 들어가 소모된다. 연료극을 검사체적으로 설정하고 질량 보존의 법칙을 적용하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.⁽⁴⁾

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2,p} - \dot{m}_{H_2,ps} - \dot{m}_{H_2,ps} \quad (7)$$

연료극과 같은 방법으로 공기극에도 적용하면,

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2,p} - \dot{m}_{O_2,ps} - \dot{m}_{O_2,ps} \quad (8)$$

2.2.2 슈퍼캐패시터

슈퍼캐패시터는 내부저항과 캐패시터의 직렬로 표현할 수 있다. RC 회로로 구성된 슈퍼캐패시터는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{V_s}{I_s} = \frac{1}{C \cdot s + \frac{1}{R}} \quad (9)$$

슈퍼캐패시터의 내부 저항값과 캐패시턴스 값은 슈퍼캐패시터의 제품 설명서의 값을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Polarization Curve

연료전지의 기본 특성 실험을 위해서 전류 변화

에 따른 전압 변화로 나타나는 Polarization curve 를 그렸다. Polarization Curve 는 공기극에서 발생하는 물의 제거에 따른 추후의 실험에서 나타나는 성능 변화를 관찰하기 위해서 두 가지 조건으로 측정하였다. 조건 1 은 공기극의 Stoichiometry 를 2 로 고정하여 측정한 것이고, 조건 2 는 공기극의 Stoichiometry 를 고려하지 않고 공기극의 유량을 압력 차이로 제어하여 측정한 것이다. Fig. 5 는 각 조건에 따른 Polarization curve 를 나타낸다. 조건 1 과 조건 2 의 전류에 대한 스택 전압의 차이는 저전류 영역에서 0.1V 로 가장 크게 나타나지만, 전류가 고전류로 가면서 차이가 적어지는 것을 확인할 수 있다. 저전류 영역에서는 Activation loss 가 주요 전압 강하 요인이기 때문에 공기극의 분압 차에 의해 전압의 차이가 발생되지만, 고전류 영역에서는 저항 손실이 전압 강하의 주요인이기 때문에 고전류 영역으로 가면서 전압 차이가 줄어드는 것이다.

3.2 연료전지의 연속 운전 특성

Fig. 6 과 Fig. 7 은 600 초간 연속 운전에 따른 각 조건에 온도 변화와 전압 변화를 나타낸다. 조건 1 의 경우 연속 운전에 따라 스택 전압이 점점 감소하여 초기 4.45V 에서 600 초 후의 4.12V 로 약 0.33V 감소하지만, 조건 2 의 경우는 초기 4.34V 에서 4.19V 로 약 0.15V 감소하는 것을 확인할 수 있다. 조건 2 의 경우 초기 전압이 조건 1 보다 낮은 이유는 Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 조건 1 의 온도가 조건 2 보다 약 5°C 정도 높고, 조건 2 에서 공기극의 유량이 많기 때문에 공기가 들어가는 첫 번째 셀에서 물의 증발로 인하여 이온 전도도가 떨어졌기 때문이다. 하지만, 전류가 인가되어 연료

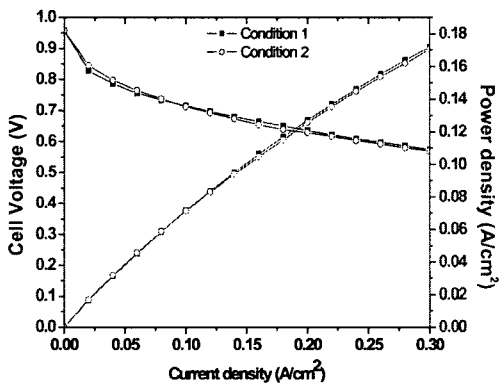


Fig. 5 Polarization curve and power density curve each experimental conditions (a) condition 1 (b) condition 2

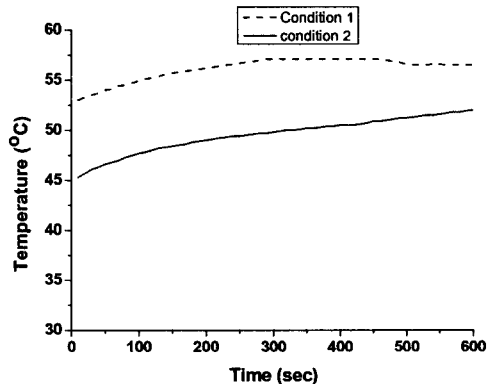


Fig. 6 Temperature variation during long term performance of PEMFC stack each experimental condition (a) condition 1 (b) condition 2

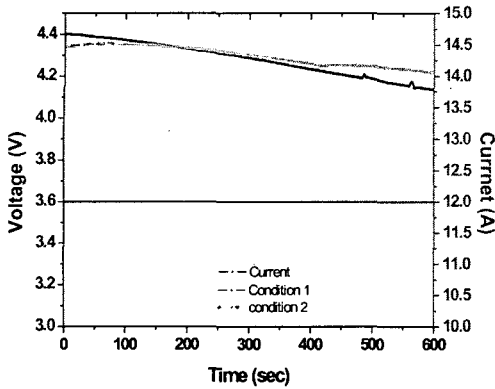


Fig. 7 Continuous operation of PEMFC stack each experimental conditions

전지에서 물이 생성되면서 조건 2의 경우 공기극 입구 쪽 셀의 이온 전도도가 상승하여 약 100 초간 전압이 다소 상승한 이후 물 생성량 증가로 점점 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 장기 성능 특성 실험을 통해 공급되는 공기의 유량이 적은 조건 1의 경우 고전류가 인가되면 공기극의 채널 내에 증발하지 못하고 남은 물이 더 빨리 증가하게 되어 조건 1보다 성능 감소가 더 급격하게 되는 것을 관찰할 수 있다.

3.3 DC/DC Converter

3.3.1 연료전지

Fig. 8은 BUS의 전류를 변화에 따른 BUS의 전압과 연료전지 전압 변화를 나타내는 그래프이다. BUS의 전류가 증가함에 따라 BUS의 전압이 12V로 일정하게 유지되는 것을 관찰할 수 있다. BUS의 전류가 3A까지 연료전지의 전압이 4V 이상을 유지하면서 BUS 전압도 일정하게 유지되었으나 전류를 4A로 증가시키기에 따라 BUS의 전압이 12V를 유지할 수 없게 된다. BUS에서 4A의 전류를 내기 위해서는 DC/DC Converter 효율을 고려할 때 연료전지에서 15A 이상의 고전류를 방출해야 한다. 하지만 15A의 고전류가 인가될 경우 연료전지의 전압은 Polarization Curve에 따라 4V 이하로 떨어지게 되어 BUS 전압을 12V로 유지할 수 없게 되는 것이다.

3.3.2 슈퍼캐패시터

Fig. 9는 슈퍼캐패시터와 DC/DC Converter를 연결하여 BUS에 고전류를 인가하여 시간에 따른 전압변화를 나타낸 그래프이다. 슈퍼캐패시터는

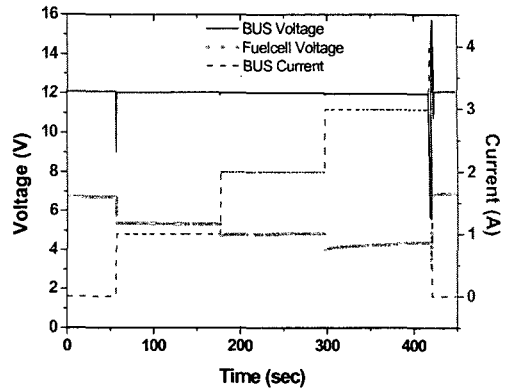


Fig. 8 Experimental results of DC BUS voltage and fuel cell voltage when the current load increases

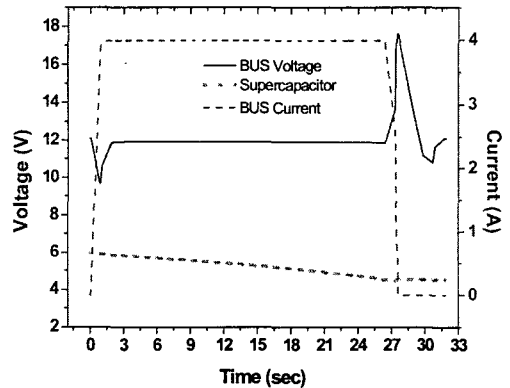


Fig. 9 Experimental results of DC BUS voltage and supercapacitor voltage at 4A

하이브리드 시스템 운전에서 고전류 영역을 담당할 목적으로 사용하였기 때문에 BUS 전류를 연료전지보다 높은 4A에서 실험을 하였다. BUS에 4A의 전류를 인가한 경우 약 25초간 안정된 전력을 방출하여 BUS의 전압이 12V를 유지하는 것을 관찰할 수 있다. 본 실험을 통하여 슈퍼캐패시터의 경우 고전류 영역을 담당하여 안정된 전력을 방출할 수 있음을 확인할 수 있고, 이를 통하여 하이브리드 시스템 운전 전략의 기초를 세울 수 있다.

3.4 운전전략

Fig. 10은 미국 도로 주행 모드를 토대로 제안된 하이브리드 전류 인가모드를 나타낸다. 고전류 영역에서 슈퍼캐패시터와 연료전지가 함께 전력을 담당하는 것이 운전전략 1이고, 전력을 슈퍼캐패

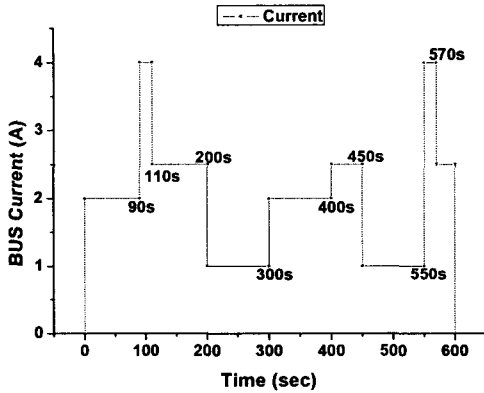


Fig. 10 Load BUS current for hybrid system

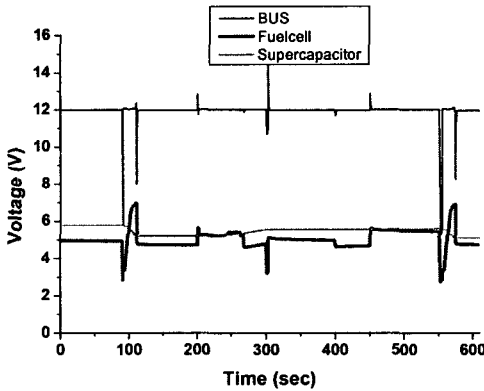


Fig. 11 Experimental results of DC BUS, supercapacitor, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 1

시터가 모두 담당하게 하는 것이 운전전략 2 이다. 운전 전략 1 의 경우 대부분의 하이브리드 시스템에서 운전 전략으로 채택되는 전략이고, 본 연구에서 제안한 전략 2 는 고전류 영역에서 연료전지의 부하 담당을 없앴으로써 공기극의 폐정 효과를 통하여 물 문제 및 동특성 향상을 기대할 수 있는 운전 전략이다. Fig. 11 과 Fig. 12 는 BUS 의 전류 인가에 따른 운전 전략 1 과 운전 전략 2 에 따른 전압 변화를 나타낸다. Fig 13 과 Fig. 14 전류가 급격하게 변하는 구간에서의 전압 응답성을 나타내는 그래프이다. BUS 의 전류 변화에 따라 BUS 전압이 대체로 12V 로 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 하지만, BUS 의 전류가 저전류에서 고전류로 바뀌는 구간에서 운전전략 1 과 2 에서 모두 BUS 의 전압이 순간적으로 12V 를 유지하지 못하였다.

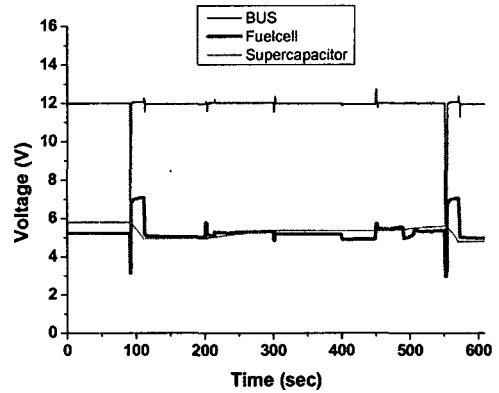


Fig. 12 Experimental results of DC BUS, supercapacitor, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 2

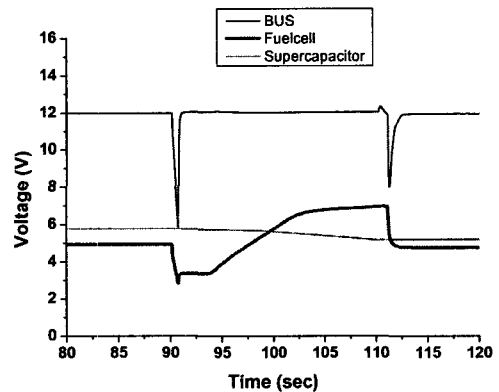


Fig. 13 Transient response of DC BUS, supercapacitor, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 1

이유는 DC Load 에서 부과된 전류를 측정하여 연료전지와 슈퍼캐패시터로 전력이 분담시키는 과정에서 전류 측정과 Labview 의 로직에 의하여 PWM 신호를 인가하는 시간 차이로 인하여 순간적으로 고전류를 영역을 연료전지가 담당하게 되었기 때문이다. 하지만 전력이 안정화 되는데 걸리는 시간을 보면 전략 1 은 약 0.9 초가 소요되는 반면, 전략 2 의 경우 1.9 초가 소요되어 전략 1 보다 약 1 초 정도 늦게 BUS 전압이 12V 로 안정화 되는데 시간적 차이를 보였다. 또한, 전략 1 의 경우 연료전지와 슈퍼캐패시터에서 동시에 전력을 담당하게 하였지만, 연료전지가 담당하는 전력이 점점 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이유는 연료전지는 전기화학 반응을 통하여 전류를 방출하지

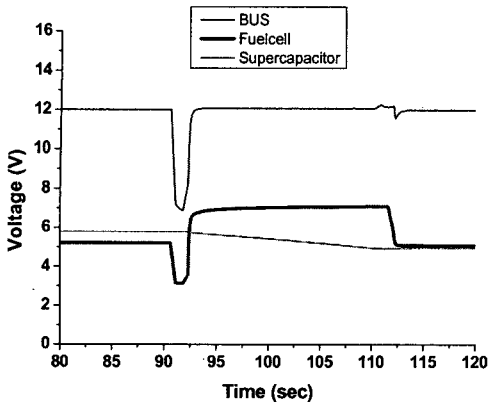


Fig. 14 Transient response of DC BUS, supercapacitor, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 2

만, 슈퍼캐패시터의 경우 전기화학반응 없이 전류를 방출하여 반응 속도가 상대적으로 크기 때문이다. 따라서 슈퍼캐패시터가 담당하는 부분이 점점 커지게 되는 것이다. 그리고 Fig. 13 과 Fig. 14 에서 볼 수 있듯이 BUS 의 전류가 고전류에서 저전류으로 바뀌는 구간에서 전략 1 의 경우 저전류에서 고전류로 바뀔 때와 유사하게 BUS 의 전압이 8V로 떨어진 후 약 1.9 초 후에 12V로 안정화 되지만, 전략 2 에서는 BUS 전압이 거의 변화 되지 않았을 뿐만 아니라 매우 빠르게 12V 로 안정화 되었다. 이러한 차이를 보인 주된 이유는 전략 1 의 경우 연료전지가 약 5 초간 15A 이상의 고전류가 흐르게 되고 그로 인하여 생성된 물의 양이 BUS 전류가 2A 일 때 보다 2 배 이상이 많아지게 되기 때문이다. 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 증발되지 않고 물방울로 생성되는 물의 양을 계산하면 0.0081g/s 가 되고, 이는 채널 내의 공기유입을 저해함으로써 연료전지의 동특성에 영향을 미치게 되는 것이다. 따라서 저전류 영역으로 바뀌면서 공기극 내에 맺힌 물방울로 인하여 공기공급이 원활하지 못하게 되기 때문에 연료전지의 동특성이 느려지게 되어 BUS 전압이 불안정하게 되는 것이다.

$$\dot{m}_{water} = 9.34 \times 10^{-5} \times I \times n \quad (10)$$

$$\dot{m}_w = 0.622 \frac{P_w}{P - P_w} \dot{m}_a \quad (11)$$

반면, 전략 2 의 경우 슈퍼캐패시터가 전력을 담당하기 때문에 연료전지 내에서의 전기화학반응으로 인한 물 생성이 없을 뿐만 아니라, 기 존재하는

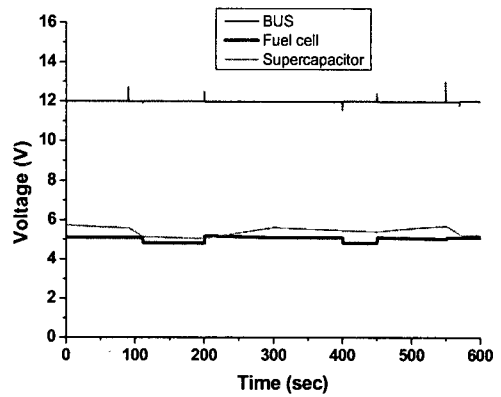


Fig. 15 Simulation results of DC BUS, supercapacitor, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 1

물방울을 채널 내로 유입되는 공기로 밀어 낼 수 있다. 이러한 현상은 연료전지가 저전류 영역에서 부하를 담당하게 될 때 빠른 전력 공급을 가능하게 하여 BUS 전압을 안정하게 유지시켜 준다. 하이브리드 시스템의 목적이 안정된 출력뿐만 아니라 경제적인 측면도 있기 때문에 운전 전략에 따른 경제적인 측면을 고려하기 위하여 효율을 계산하였다. 아래 식 (12)을 이용하여 각 운전 전략에 따른 효율을 계산한 결과 전략 1 과 2 의 효율이 각각 80.3%와 80.9%가 되어 약간 전략 2 가 높은 효율을 나타내었다. 하지만, 0.5%의 효율 차이는 DC/DC Converter 의 효율의 변화에 따라 줄어들거나 증가할 수 있기 때문에 전략 1 보다 전략 2 가 고효율이라 말하기는 어렵다.

$$\eta_{system} = \frac{BUSoutput\ energy + Remant\ energy\ of\ supercapacitor}{Input\ energy\ (from\ fuel\ cell)} \quad (12)$$

3.5 모델 결과

Fig. 15 와 Fig. 16 은 운전 전략 1 과 2 를 모델에 적용하여 얻은 BUS, 연료전지 그리고 슈퍼캐패시터의 전압을 나타낸 그래프이다. 운전 전략 1 과 2 모두 BUS 의 전류가 변함에 따라 BUS 전압의 큰 변화 없이 안정적으로 12V 가 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 전략 1 의 경우 고전류에서 연료전지와 함께 전력을 담당하기 때문에 전략 2 에 비하여 슈퍼캐패시터의 전압이 충전 후 높은 것을 알 수 있으며, 실험과 달리 저전류 영역에서 고전류 영역으로 바뀌는 순간 BUS 전압이 불안정해 지는 부분은 나타나지 않음을 알 수 있다. 이를 통하여

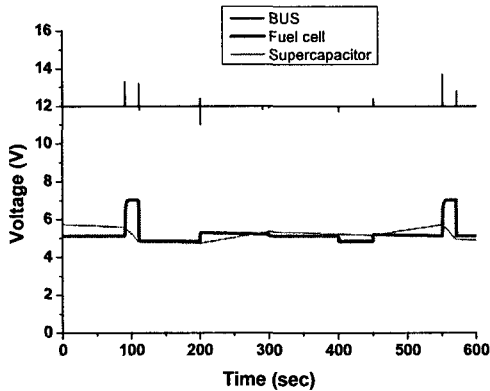


Fig. 16 Simulation results of DC BUS, supercapacitor, and fuel cell voltage according to load BUS current based on strategy 2

저전류에서 고전류로 바뀌는 순간 BUS의 전압이 일시적으로 전압이 떨어지는 것은 전류의 측정을 통한 PWM 신호의 인가에 따른 시간적 차이로 발생되었다는 것을 알 수 있다. 또한, 고전류에서 저전류로 바뀌는 구간에서 전략 2의 경우 모델 결과와 실험결과가 동일하게 BUS 전압의 변화가 없지만, 전략 1의 경우 모델 결과와 달리 실험의 BUS 전압은 의 공기극 채널 내의 물방울로 인한 연료전지 동특성 감소 때문임을 알 수 있다.

4. 결론

연료전지와 슈퍼캐패시터 하이브리드 시스템을 제작하고 운전 전략에 따른 전력 변화의 안정성에 관하여 연구하였다.

먼저 연료전지의 특성 파악을 위해서 Polarization Curve와 전류 변화에 따른 동특성 실험 및 연속 운전 특성 실험을 공기극의 Stoichiometry 변화에 따라 실험하였다. 물 문제를 고려하여 하이브리드 시스템 실험에서 공기극의 높은 Stoichiometry에서 실험 조건을 잡게 되었다. DC/DC Converter를 제작하여 연료전지와 슈퍼캐패시터의 연동 실험을 수행하여 BUS 전류가 고전류 영역(3A 이상)에서 연료전지의 전압이 4V 이하가 되어 BUS 전압이 12V를 유지할 수 없음을 확인하였다. 따라서 하이브리드 시스템의 운전전략을 저전류 영역과 고전류 영역으로 구분하여 저전류를 연료전지가 담당하고 고전류 영역을 슈퍼캐패시터와 연료전지가 동시에 분담하도록 하는 운전 전략 1과 슈퍼캐패시터만으로 담

당하게 하는 전략 2로 나누어 세우게 되었다. 시내 주행 모드를 토대로 전류 모드를 구성하여 하이브리드 시스템에 인가하여 실험과 MATLAB/Simulink™를 이용하여 각각의 운전전략에 따른 출력의 안정성과 효율을 측정하였다. 운전 전략 1을 사용할 경우 좀 더 빠르게 고출력을 낼 수 있고, 장시간 고출력을 유지할 수 있다. 반면, 운전 전략 2를 택할 경우 전략 1보다 약간 높은 효율뿐만 아니라 고전류 영역에서 슈퍼캐패시터가 모든 부하를 담당함으로써 연료전지 공기극 내에 생성된 물을 제거하여 연료전지의 동특성을 향상시켜 안정한 전력을 공급할 수 있다. 그리고 운전 중에 공기극의 퍼징을 위한 시간을 두지 않아도 될 뿐만 아니라 이러한 운전 전략을 적용함으로써 퍼징을 위한 공기 공급 장치의 더 큰 전력과 설비가 요구되지 않고 운전이 가능하다.

참고문헌

- (1) Joongmyeon Bae, 2005, "Introduction of Fuel Cell Vehicle," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 12~20.
- (2) Duckyu Hyun and Junbom Kim, 2004, "Study of External Humidification Method in Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 126, pp. 98~103.
- (3) EunAe Cho, Jae-Joon Ko, Heung Yong Ha, Seong-Ahn Hong, Kwan-Young Lee, Tae-Won Lim and In-Hwan Oh, 2004, "Effect of Water Removal on the Performance Degradation of PEMFCs Repetitively Brought to <math><0^{\circ}\text{C}</math>," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 151, pp. A661~A665.
- (4) Pathanpati, P. R., Xue, X. and Tang, J., 2005, "A New Dynamic Model for Predicting Transient Phenomena in a PEM Fuel Cell System," *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 1~22.
- (5) Dougal, R.A., Liu, S. and White, R.E., 2002, "Power and Life Extension of Battery-ultracapacitor Hybrids," *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions*, Vol. 25, Issue: 1, March 2002, pp. 120~131.
- (6) Jeferson M. Correa, Felix A. Farret, Lciane N. Canga, and Marcelo Gsimoes, 2005, "An Electrochemical-Based Fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 5, pp. 1103~1112.
- (7) In-ju Kim, 2005, "A Study on Bi-directional DC/DC Converter for 42V Power System of Hybrid Electric Vehicle," Master's thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Deajeon, Korea.