

소형 PEM 연료전지 스택의 제어 알고리즘 개발

金兌勳*, 崔宇鎭†

Development of the Control Algorithm for the Small PEM Fuel Cell Stack

Tae-Hoon Kim, and Woojin Choi

요 약

소형 PEM (Proton Exchange Membrane) 연료전지 시스템은 가습이 필요치 않아 상용화의 가능성이 크지만 그 제어 방법은 뚜렷하게 정립되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 소형 PEM 연료전지 시스템의 제어를 위해 이중 루프 구조의 제어방식을 정립하고 DSP (Digital Signal Processor)를 이용하여 구현한다. 일반적으로 연료전지 시스템에서 제어의 핵심 요소는 크게 공기와 수소의 공급, 스택 내부의 수분 관리, 스택의 온도 관리로 나뉜다. 별도의 가습이 없이 공랭식으로 구동되는 소형 PEM 연료전지 스택의 제어에 있어서 팬은 스택의 공기 공급과 열관리 및 수분관리를 위한 핵심적인 역할을 하며, 퍼지밸브는 스택 내부의 잉여수분을 배출한다. 제안된 방식은 이중 제어 루프를 이용한 팬의 제어를 통해 팬의 과도응답을 빠르게 하여 공기의 공급 속도를 개선시키며, 연료전지 스택의 전압변화를 피드백 하여 보상해줌으로써 연료전지가 부하변동에 대해 신속한 응답 특성을 갖도록 하였다. 제안된 방법의 유용함은 60W급 소형 PEM 연료전지 시스템의 실험과 이를 이용한 노트북 컴퓨터의 구동을 통해 검증된다.

ABSTRACT

Small PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell systems do not require humidification and have great commercialization possibilities. However, methods for controlling small PEM fuel cell stacks have not been clearly established. In this paper, a control method for small PEM fuel cell systems using a dual closed loop with a static feedforward structure is defined and realized using a DSP (Digital Signal Processor). The fundamental elements that need to be controlled in fuel cell systems include the supply of air and hydrogen, water management inside the stack, and heat management of the stack. For small PEM fuel cell stacks operated without a separate humidifier, fans are essential for air supply, heat management, and water management of the stack. A purge valve discharges surplus water from the stack. The proposed method controls the fan using double control loops to quicken transient response of the fan thereby improving the supply rate of air. Feedback control to compensate for the voltage change in fuel cell stack improves the response characteristics in fuel cell to load variations. The feasibility of proposed method was proved by the experiments with a 60W small PEM fuel cell system and operation of a notebook computer using this system.

Key Words : Small PEM fuel cell, Balance of Plant, Dual loop control, Air supply, Water management, DSP

†교신저자 : 정희원, 숭실대 전기공학부 조교수

E-mail : cwj777@ssu.ac.kr

*학생회원, 숭실대 전기공학부 석사과정

접수일자 : 2009. 12. 23

1차 심사 : 2010. 1. 12

심사완료 : 2010. 1. 14

1. 서 론

최근 소형 전자기기의 디지털 컨버전스 추세에 맞춰 이들 기기의 소비전력이 비약적으로 높아짐에 따라 2

차전지만으로는 요구되는 에너지 밀도를 충족시키기 어려운 상황에 이르렀다^[1]. 따라서 2차전지보다 에너지 밀도가 획기적으로 높아 이러한 한계를 극복할 수 있는 고효율 전원으로서 PEM (Proton Exchange Membrane) 연료전지가 각광을 받고 있다^[2]. 이러한 PEM 연료전지 시스템은 전기를 발생시키는 연료전지 스택과 연료의 공급, 압력, 온도 및 습도를 제어하여 스택의 운전을 보조하는 BOP (Balance of Plant)로 구성된다. 소형 연료전지 시스템에서 BOP의 최적 조건은 최소의 전력을 소비하면서 안정된 스택의 운전을 보장함과 동시에 전체 시스템의 효율을 향상시키는 것이며, 주된 기능은 반응에 필요한 연료 (공기와 수소)를 공급하여 주며, 연료전지 스택의 열관리 및 MEA (Membrane Electrode Assembly)의 수분관리를 수행하는 것이다^[3]. 소형 연료전지 시스템에서 수소는 보통 고압 실린더 또는 수소저장 합금 실린더로부터 압력조절기를 통해 스택에 직접 연결되어 공급되며, 이때 공급되는 수소의 유량은 부하변동에 따른 스택 내부의 순시적인 압력 차에 의해 결정된다. 따라서 소형 PEM 연료전지 시스템의 경우 수소 유량의 제어를 위한 별도의 기기는 필요치 않으며, 제어를 위해 펌프나 모터 등을 사용한다면 전체 시스템의 크기나 가격 및 BOP의 소비 전력을 상승시켜 바람직하지 않게 된다. 동일한 이유로 스택의 수분관리를 위해 외부 가습기를 사용하는 것도 경제적이지 않다. 소형 연료전지 시스템에서는 별도의 가습 장치 없이 팬을 통해 반응과 냉각에 필요한 공기를 공급하며, 퍼지 밸브를 통해 스택 내부의 잉여수분을 배출한다. 따라서 이들의 적절한 제어를 통해 수분 및 열관리를 수행하여 시스템을 운전하는 것이 경제적이며 효율적인 방법이 된다.

본 논문에서는 외부 가습기를 사용하지 않는 소형 연료전지 스택의 BOP 제어 방법에 대해 기술한다. 제안된 방식은 스택 내부의 수분과 열이 평형을 이룰 수 있도록 하는 연료의 량을 계산하여 공급함으로써 시스템 전체의 제어를 성취하며, 이를 통해 운전 신뢰성을 확보할 수 있다. 제안된 방식의 유용함은 60W급 소형 연료전지 스택을 이용한 실험을 통해 검증된다.

2. 소형 PEM 연료전지 스택의 BOP 구성 및 제어 알고리즘

그림 1은 소형 PEM 연료전지 스택(60W)을 이용한 노트북 컴퓨터 전원 시스템의 구성도이다. 본 논문에서 사용된 연료전지는 60W급 PEM 연료전지 스택

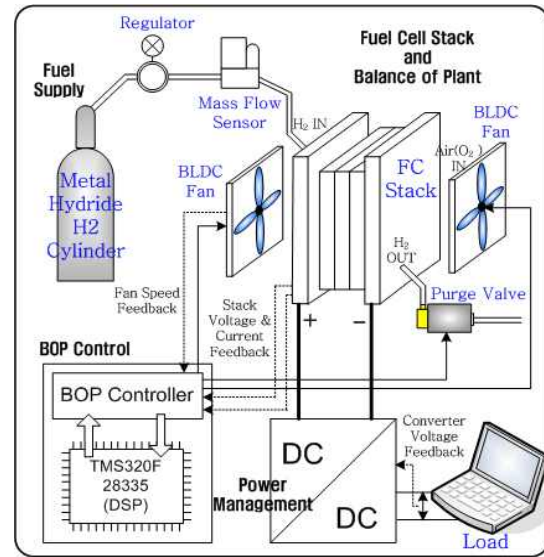


그림 1 소형 PEM 연료전지 스택(60W)을 이용한 노트북 컴퓨터 전원 시스템

Fig. 1 Notebook computer power supply system using a small PEM fuel cell stack(60W)

로 10개의 단전지로 이루어져 있으며, 전극의 면적은 50cm²으로 BCS Fuel Cell사에서 제작되었다. 순도 99.99%의 수소 사용이 요구되며, 본 연구에서 수소는 저장장치로부터 출력되어 압력 조절기에 의해 0.2기압으로 감압된 뒤 스택에 공급된다. 또한 반응을 위해 필요한 공기를 공급하기 위해 블로워 (Blower) 대신 소형 냉각팬을 이용하여 공기의 공급과 냉각을 동시에 수행하였으며, 무가습 (Self-Humidified) 스택으로서 가습을 위한 별도의 장치 없이 구동되기 때문에 시스템이 단순해질 수 있어 소형 전원으로 이용하기 적합하다. 이와 같은 시스템의 제어는 연료전지 스택의 출력을 피드백 하고 스택의 열 및 물의 관리를 고려하여 계산된 반응에 필요한 연료가 신속히 공급되도록 제어하는 방식에 의해 구현이 가능하다^[4]. 그림 2는 본 논문에서 제안한 방식의 제어 알고리즘을 적용한 소형 PEM 연료전지 시스템의 블록도이다.

2.1 피드포워드 제어 루프

소형 연료전지 스택의 운전에 필요한 기준 공기유량은 스택의 냉각을 위해 필요한 유량인 식 (1)과 반응을 위해 필요한 유량인 식 (2)의 합이 된다^[5].

$$\dot{m}_{cool,air} = \frac{Q_{stack} - \sum Q_{dis} - Q_{reac}}{c_p \Delta T_{cool}} \quad (1)$$

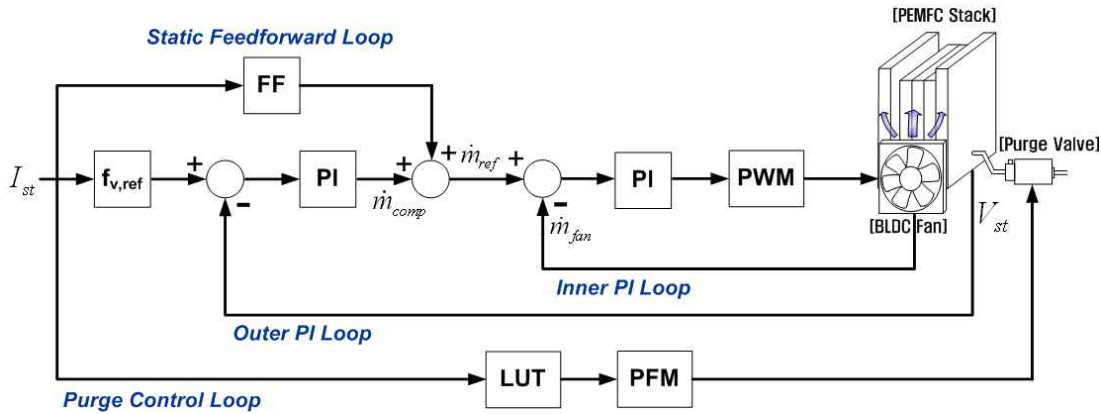


그림 2 제안된 방식의 소형 PEM 연료전지 스택의 제어 알고리즘 블록도
Fig. 2 Block diagram of the proposed control algorithm for the small PEM fuel cell stack

$$\dot{m}_{\text{reac,air}} = \frac{P_e}{4 \times V_{\text{cell}} \times F} \times \frac{1}{0.21} \times \lambda_{\text{air}} \quad (2)$$

여기서, Q_{stack} 은 스택 구동 시 발생하는 열량[W], $\sum Q_{\text{dis}}$ 는 복사와 대류에 의한 스택의 자연 냉각량[W], Q_{reac} 은 스택의 연료로 사용된 유량에 의한 냉각량[W], c_p 는 공기의 정압 비열[J/(mol·K)], ΔT_{cool} 은 냉각용 공기의 온도차, P_e 는 연료전지 스택의 전력[W], V_{cell} 은 스택의 셀 당 전압[V], F 는 패러데이 상수 [coulomb/mol], λ_{air} 는 공기의 화학량론이다.

하지만 이렇게 구한 값은 비선형적이고 실제 이 값을 매번 계산하는 것은 많은 계산을 요구할 뿐만 아니라 많은 온도 및 습도 센서의 사용을 전제로 한다. 따라서 본 논문에서는 이를 스택 전류별 요구되는 기준 공기유량으로 계산하고 커브 피팅하여 식 (3)과 같은 다항식으로 변환한 뒤 사용하였다.

$$\dot{m}_{\text{ref}} = 0.0001I_{\text{st}}^3 - 0.0010I_{\text{st}}^2 + 0.0084I_{\text{st}} + 0.0269 \quad (3)$$

연료전지 스택의 과도 응답 특성 상 부하 급변 시 전류의 응답 속도는 빠르게 부하를 추종하는 반면에 전압의 과도응답은 상대적으로 시간지연을 갖는다. 따라서 시스템의 빠른 반응을 위해서는 스택의 전류로부터 계산된 기준 공기유량인 식 (3)을 그림 2와 같이 피드포워드 루프를 통하여 공급해 주어야 하며, 이를 내부 PI 제어 루프와 같은 주기로 제어하였다.

2.2 내부 PI 제어 루프

운전에 필요한 기준 공기 유량을 신속히 공급하고 평균 소비전력을 줄이기 위해서는 팬의 속도 제어가

필수적이다. 팬의 속도 제어에는 여러 방법이 있지만, 본 논문에서는 정확성이 높고 비교적 잡음 수준이 낮으며 외부 구성요소로 인한 전력손실이 없어 효율이 좋은 내장 PWM (Pulse Width Modulation) 방식을 이용하여 PI 제어를 수행하였다. BLDC 모터의 인가전압에 대한 각속도의 일반적인 전달함수는 식 (4)와 같이 표현되며^[6], 팬의 속도 제어기 설계를 위해서는 이러한 팬의 전달 함수를 알아야 한다.

$$G(s) = \frac{\omega_m(s)}{V(s)} = \frac{K \times \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

본 논문에서는 팬의 스텝 응답 실험을 수행한 뒤 LabVIEW 소프트웨어의 System Identification Toolkit을 이용하여 전달함수를 추정하였다. 그림 3은 스텝 전압 입력에 대한 팬의 응답 특성 시험이며, 추정된 모델의 응답이 실험 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

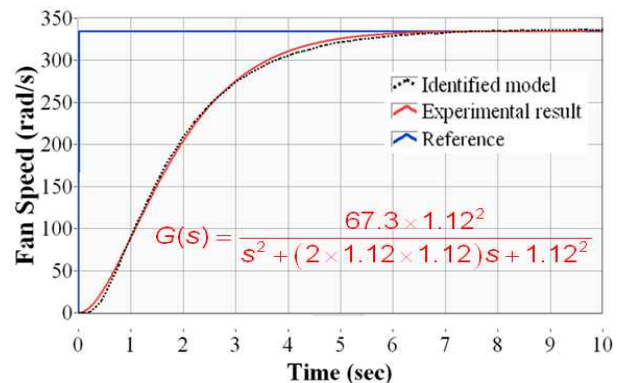


그림 3 팬의 스텝 응답
Fig. 3 Step response of the fan

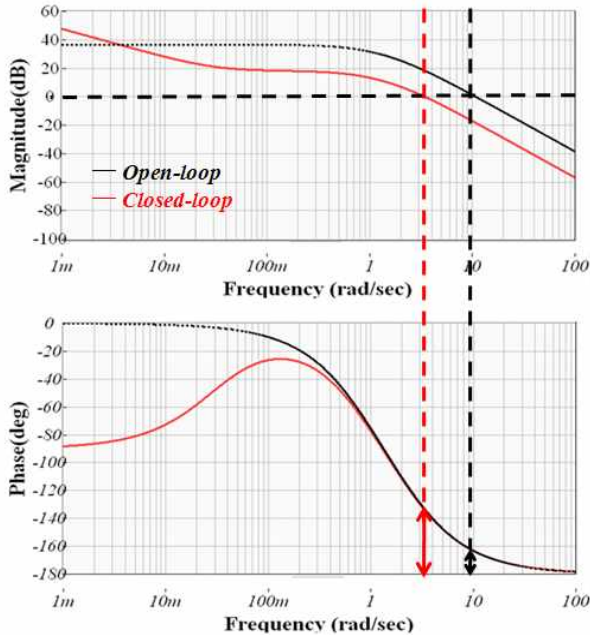


그림 4 팬의 개루프 및 폐루프 보드 선도
Fig. 4 Open-loop and closed-loop bode plots of the fan

표 1 내부 PI 제어기의 이득
Table 1 Gain of the inner PI controller

비례(Proportional) 이득	0.12
적분(Integral) 이득	0.0032

표 2 외부 PI 제어기의 이득
Table 2 Gain of the outer PI controller

비례(Proportional) 이득	0.024
적분(Integral) 이득	0.00002

팬은 그림 3과 같이 오버슈트가 없는 과제동 특성을 나타낸다. 시스템의 스텝 응답시간은 약 6초 정도며, 이처럼 느린 과도응답은 결국 필요한 공기의 공급을 지연시키게 된다. 따라서 그림 2와 같이 팬의 폐루프 시스템을 내부 제어루프로 구성하고 PI 제어기를 이용하여 팬에 인가되는 PWM 파형을 제어함으로써 팬의 과도응답을 개선시켰다^[7]. 표 1은 내부 PI 제어기의 이득이다. 그림 4는 팬의 개루프 및 폐루프의 이득-위상 곡선이며, 그림에서 보듯이 폐루프 시스템의 위상여유가 약 45° 정도 되어 안정함을 확인할 수 있다.

2.3 외부 PI 제어 루프

연료전지 스택의 운전에 필요한 기준 공기유량은 식

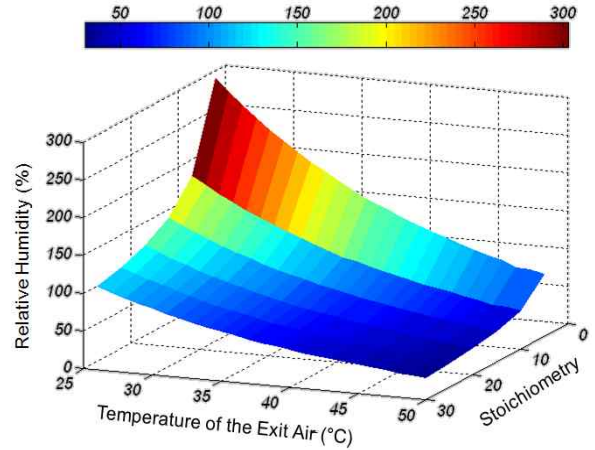


그림 5 화학량론과 출구 공기 온도에 따른 상대습도 그래프
Fig. 5 A graph of relative humidity versus temperature and stoichiometry

(3)을 이용하여 피드포워드 제어 루프를 통해 공급된다. 하지만 스택의 전류만을 관측하여 제어할 경우 연료전지 스택의 전압이 정상상태의 운전점과 다른 운전점에서 운전 될 경우 이를 보상해 줄 수 없으며, 이에 따라 운전 안정성을 확보하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 피드백 된 전압 값과 정상상태에서 연료전지 스택 전압과의 차를 계산한 뒤 PI 제어하여 보상항을 만들고 팬의 기준 공기 유량에 더해 주는 외부 PI 제어 루프를 구성하였다. 이러한 외부 제어루프는 팬을 PI 제어하는 내부 제어루프에 비해 1/10의 속도로 느리게 작동하며, 피드백 되는 전압에는 이동 평균법을 적용하여 노이즈나 순시적인 스택 전압 변동에 둔감하게 루프를 형성하였다. 그러나, 소형 연료전지 시스템에서는 팬의 공기 공급을 통해 MEA의 수분관리도 수행되기 때문에 외부 루프를 통해 추가 혹은 감소되는 유량이 이에 영향을 미치면 안 된다. PEM 연료전지 스택 내부의 MEA가 적절한 수분을 갖게 하기 위한 조건은 캐소드 출구공기의 상대습도를 80~100%로 충족시켜주는 것이며^[8,9], 외부 루프를 통해 스택에 공급되는 유량이 변화하더라도 이를 유지해야 한다. 따라서 외부 제어 루프에 의한 보상 유량이 있을 경우에도 해당온도에서 캐소드 출구 공기의 상대습도가 80% 이하가 되지 않도록 공급되는 공기의 유량을 제한하여야 한다. 마찬가지로 최소 공기 유량은 출구공기의 상대습도가 100% 이상이 되지 않게 하는 값이 되며, 외부 루프 제어 시 이러한 조건에 부합하도록 공기 유량을 제한하는 것이 요구된다. 여기서 캐소드 출구 공기 온도의 변화는 전압 변화에 비해 매우 느리기 때문에 온

도 변화에 의한 영향은 고려하지 않아도 된다. 그림 5는 각 화학량론에 따른 캐소드 출구 공기 온도와 상대습도의 관계 및 허용되는 상대습도의 범위를 보여주고 있으며, 표 2는 외부 PI 제어기의 이득이다.

2.4 퍼지(Purge) 제어 루프

연료전지 스택의 캐소드측에서는 전기화학 반응의 부산물로 수분이 생성되며, 이는 스택 전류의 증가에 따라 선형적으로 증가한다. 외부 가습 장치가 없는 소형 PEM 연료전지 스택에서는 동작조건에 맞게 출구 공기의 상대습도를 맞춰주는 화학량론을 설정해 줌으로써, 생성된 수분이 전기삼투 항력 (Electro-osmotic Drag)과 역확산 (Back Diffusion)에 의해 MEA내에서 적절히 순환되도록 한다. 그러나 특히 중부하에서 캐소드측에 생성되는 수분이 많아질 경우, 전기삼투 항력에 비해 역확산률이 높아지면서 캐소드측으로부터 애노드측으로 대다수의 수분이 역확산 되어 축적되게 된다^[10]. 따라서 이러한 잉여수분의 축적은 과수분상태 (Flooding)을 일으키며, 이를 방지하기 위해서는 퍼지 (Purge)를 통한 수분의 배출이 요구된다. 주로 퍼지조작은 스택 출력과 퍼지 주기의 함수로 프로그램 할 수 있으며^[11], 본 논문에서는 실험을 통해 만든 부하 전류에 대한 퍼지주기의 Look-up Table을 이용하여 솔레노이드 밸브를 PFM (Pulse Frequency Modulation) 방식으로 제어하였다.

2.5 연료전지 스택의 BOP 제어 회로 및 모니터링 회로 구성

앞서 언급한 연료전지 스택의 BOP 제어 알고리즘을 바탕으로 BOP 제어 회로를 구현하였다. 연료전지 스택의 전류는 LEM사의 LA-55P 전류 센서를 이용하고, 스택의 전압은 저항 분배를 통해 검출하여 TI사의 32-bit DSP (Digital Signal Processor)인 TMS320F28335의 A/D 컨버터에 인터페이스 된다. 유량제어를 위한 BLDC 팬의 속도 제어를 위해, National Semiconductor사의 주파수-전압 변환 센서인 LM2917을 이용하여 팬의 속도를 검출하고 제어 하였다. 각 센서를 통해 측정된 연료전지 스택의 전압, 전류 및 팬 속도를 바탕으로 시스템은 최적 운전조건에서 동작하도록 자동제어 된다. 또한 모니터링 회로와 NI사의 LabVIEW 8.6 소프트웨어 및 데이터 수집장치 PCI-6154를 이용하여 연료전지 스택의 제량들을 실시간으로 측정하고 기록하였다. 그림 6은 LabVIEW 8.6 소프트웨어로 구성된 모니터링 시스템 화면이다.

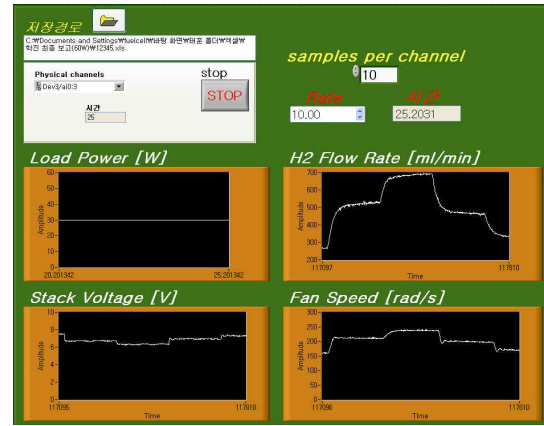


그림 6 LabVIEW를 이용한 모니터링 시스템
Fig. 6 Monitoring system using LabVIEW

표 3 부스트 컨버터의 설계 사양

Table 3 Specification for the boost converter

출력	60 [W]
입력 전압	6 ~ 9 [V]
출력 전압	19 [V]
스위칭 주파수	60 [kHz]
인덕터	62 [μH]
커패시터	1360 [μF]

표 4 부스트 컨버터용 Type 3 보상기의 파라미터 값

Table 4 Parameters of the Type 3 Compensator for the boost converter

R ₁	10 [kΩ]
R ₂	2.2 [kΩ]
R ₃	49.1 [Ω]
C ₁	1.92 [μF]
C ₂	9.45 [nF]
C ₃	0.42 [μF]

3. 전력변환기 및 보상기의 설계

본 연구에서 사용한 60W PEM 연료전지는 부하변동에 따라 출력전압이 변하므로 노트북의 외장 파워서플라이의 출력과 같은 19V의 일정한 출력 전압을 만들기 위해서 비절연형 승압 컨버터를 설계하였으며, 설계 사양은 표 3과 같다.

Non-Isolated Boost Type의 전력변환기의 제어 전달함수는 상태 공간 평균화법을 이용하여 CCM

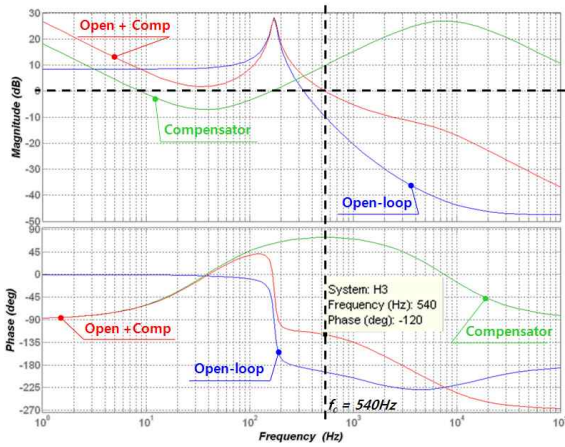


그림 7 부스트 컨버터의 전달함수 및 보상기 설계
 Fig. 7 Transfer function of the boost converter and design of the compensator

에 영점이 존재하므로 이를 고려하여 교차 주파수를 선정하여야 하며^[12], 본 연구에서는 540Hz로 선정하였다. 이때의 이득은 -9.88dB이고 위상은 -194도 이므로, 교차주파수에서의 위상 여유를 위해 Type 3 보상기를 선택하고, K-factor법을 이용해 보상기를 설계하였으며, 식 (5)와 표 4는 각각 보상기의 전달함수 및 파라미터 값이다. 보상 후 교차주파수에서의 위상여유는 약 60도가 되도록 설계하였다.

$$\frac{v_c(s)}{v_o(s)} = \frac{(1 + sC_1R_2)\{1 + sC_3(R_1 + R_3)\}}{s(C_1 + C_2)R_1(1 + sC_3R_3)\left(1 + s\frac{C_1C_2R_2}{C_1 + C_2}\right)} \quad (5)$$

4. 실험 및 고찰

제안된 시스템의 적절함을 실험을 통해 평가하기 위하여 그림 8과 같이 노트북 컴퓨터용 소형 PEM 연료전지 전원 시스템을 제작하였으며, 실험을 실시하였다.

우선 시스템의 제어 성능을 검증하기 위해 제안된 방식의 제어 알고리즘을 통해 제어되는 소형 60W PEM 연료전지 스택에 전자부하를 이용하여 그림 9와 같은 부하전력 프로파일을 적용한 뒤 스택의 전압과 전류의 파형을 측정하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 연료전지 스택의 출력이 부하 변동에 대해서도 안정한 추종 성능을 보임을 알 수 있다. 이때 측정된 연료 소모량 변화의 실시간 파형은 그림 11과 같다. 그림 9와 같은 전력 프로파일을 적용하였을 경우 부하에 전달된 총 에너지는 4729J 이었고, 유입된 수소의 몰수를 계산해 본 결과 0.044mole 이었으며, 평균 효율은 44.4%로 계산되었다^[5].

그림 12에서는 제안된 방식으로 운전되는 연료전지 시스템의 출력을 부스트 컨버터를 통해 노트북 컴퓨터에 연결하여 구동하는 실험을 실시하고, 노트북 기동 시 및 기동완료 이후의 연료전지의 출력전압 및 전류 그리고 컨버터의 출력 전압, 전류를 측정하였다. 그림 12 (a)의 컨버터 출력 전류 파형에서 알 수 있듯이 초기 기동 시 노트북 컴퓨터에는 순간적으로 약 4A의 전류가 인가되며, 이에 따라 연료전지 스택의 전압은 큰 폭으로 하락하는 반면 스택의 전류는 큰 폭으로 상승하는 것을 알 수 있다. 노트북 컴퓨터의 이러한 불안정한 초기 과도특성에도 불구하고 연료전지 스택은 shut-down 되지 않고 구동되었으며, 시동 후 약 400ms 후에 컨버터의 출력 전압은 19V로 정상동작 하였다. 또한 부하 전력에 따라 스택의 출력이 안정적으

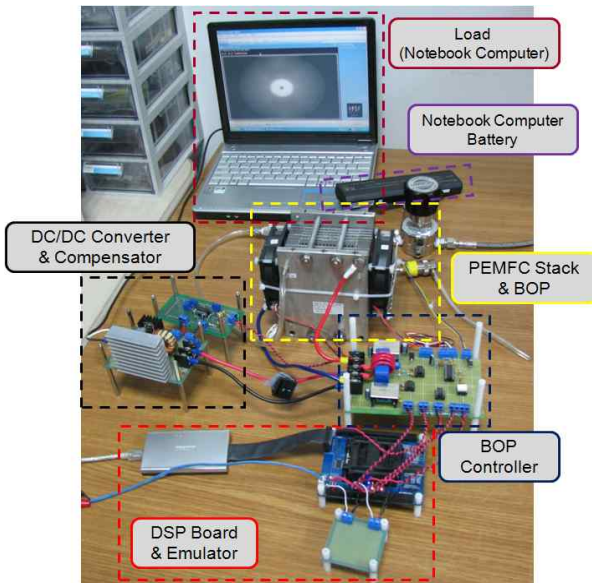


그림 8 개발된 노트북 컴퓨터용 소형 PEMFC 전원 시스템
 Fig. 8 Developed notebook computer power supply system with a small PEM fuel cell

(Continuous Conduction Mode)에서 스위치의 시비율에 대한 출력 전압으로부터 소신호 전달함수로 유도될 수 있다. 또한 루프이득은 유도된 제어 전달함수, 오차 증폭기의 전달함수, 비교기의 이득 및 피드백전압 이득을 고려하여 계산할 수 있다.

그림 7은 부스트 컨버터의 전달함수를 이용하여 전압모드 보상기의 설계를 Matlab을 통해 수행한 과정을 나타낸다. 부스트 컨버터에서는 복소평면의 우반면

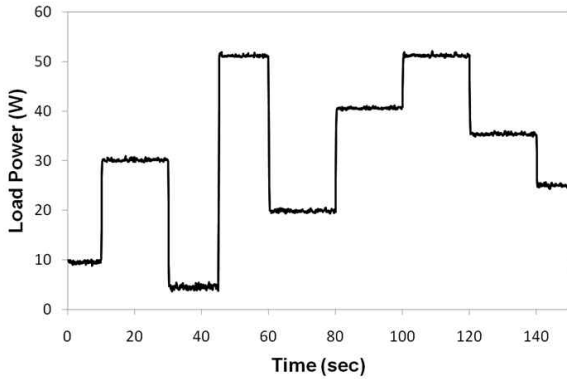


그림 9 연료전지 스택의 부하 프로파일
Fig. 9 Load profile of the fuel cell stack

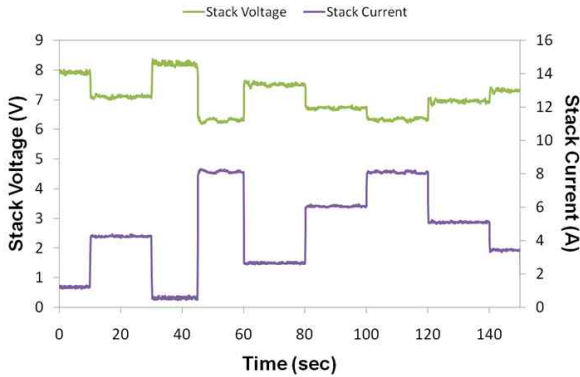


그림 10 그림 9의 부하 프로파일에 따른 연료전지 스택의 전압 및 전류 파형
Fig. 10 Voltage and current waveform of the fuel cell stack by the load profile in Fig. 9

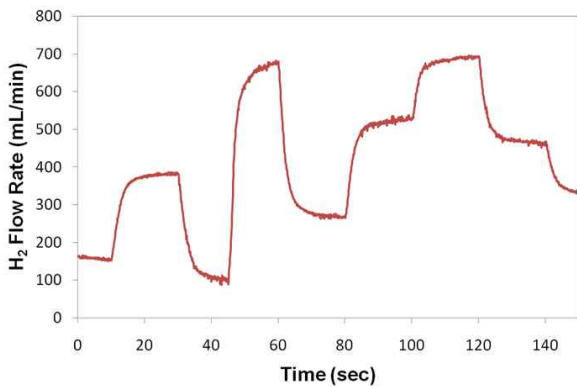


그림 11 그림 9의 부하 프로파일에 따른 연료전지 스택의 연료 소모량 파형
Fig. 11 Fuel flow rate waveform of the fuel cell stack by the load profile in Fig. 9

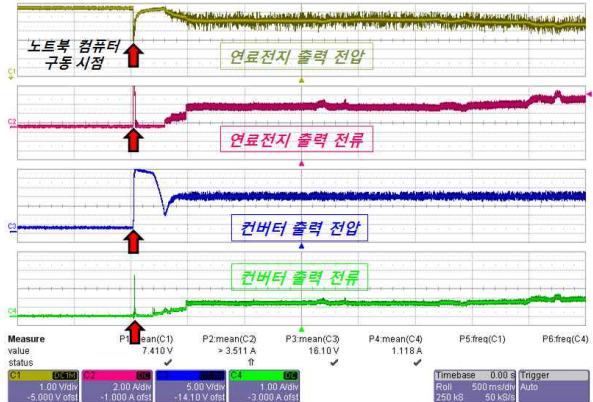


그림 12 (a) 노트북 컴퓨터 기동 시 전압 및 전류 파형들
Fig. 12 (a) Voltage and current waveform at the start-up of the notebook computer

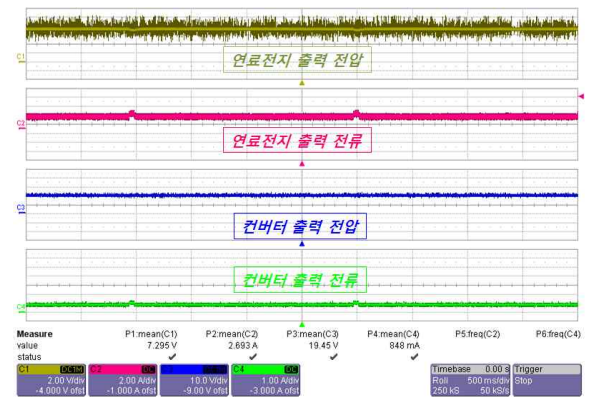


그림 12 (b) 노트북 컴퓨터 기동 후 전압 및 전류파형들
Fig. 12 (b) Voltage and current waveform after the start-up of the notebook computer

로 추종되었으며(그림 12 (b)), 이를 통해 제안된 연료 전지 스택 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 소형 PEM 연료전지 스택의 BOP 제어를 위해 이중루프 구조의 제어방식을 제안하였으며, 이를 바탕으로 설계한 부스트 컨버터와 인터페이스 되는 노트북 컴퓨터용 전원장치에 관해 제안하고 시작품을 제작하였다. 제안된 방식의 제어 알고리즘은 팬의 과도 응답특성을 향상시켰으며, 피드포워드 제어를 통해 스택 전류로부터 계산된 공기유량을 공급하고, 외부 제어루프를 통해 스택의 전압변화를 피드백하여 이루어진 추가적인 공기 유량 보상을 통해 스택의 운전이 최대 출력점에서 안정하게 이루어지도록 구성하였

다. 제안된 제어방식은 소형 무가습 PEM 연료전지 스택을 휴대용 전자기기에 적용하여 상용화하는 데 크게 기여할 것으로 기대된다.

본 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-331-D00212)

참 고 문 헌

- [1] 문고영, 김 혁, 유황찬, 노태근, 이원호, "휴대용 직접 메탄올 연료전지 시스템 개발", *한국 신재생에너지학회지*, Vol. 3, No. 1, pp. 46-53, March, 2007.
- [2] 김태훈, 최우진, "PEM 연료전지를 이용하는 휴대용 전원의 개발", *전력전자학술대회논문집*, pp. 61-63, July, 2007.
- [3] Jay T. Pukrushpan, et al, *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*, Springer, 2004.
- [4] Tae-Hoon Kim, Woojin Choi, "Control system design for the small proton exchange membrane fuel cell stack", *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2009*, 31st International, 2009.
- [5] 김태훈, 최우진, "마이크로프로세서를 이용한 소형 PEM 연료전지 스택의 제어", *전력전자학회 논문지*, Vol. 13, No. 6, pp. 469-475, December, 2008.
- [6] J.P. Bird, *Model of the Air System Transients in a Fuel Cell Vehicle*, Masters Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [7] Dogan Ibrahim, *Microcontroller Based Applied Digital Control*, John Wiley and Sons, 2006.
- [8] James Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Explained, 2nd edition*, John Wiley and Sons, 2003.
- [9] Felix N. Büchi, Supramaniam Srinivasan, "Operating Proton Exchange Membrane Fuel Cells Without External Humidification of the Reactant Gases", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 144, Issue 8, pp. 2767-2772, August, 1997.
- [10] G.J.M. Janssen, M.L.J. Overvelde, "Water transport in the proton-exchange-membrane fuel cell: measurements of the effective frag coefficient", *Journal of Power Sources*, Vol. 101, pp. 117-125, January, 2001.
- [11] Frano Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, 2005.
- [12] Christophe P. Basso, *Switch-mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs*, The McGraw-Hill Companies, 2008.

저 자 소 개



김태훈(金兌勳)

1983년 9월 18일생. 2009년 숭실대 전기공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정.



최우진(崔宇鎭)

1967년 1월 7일생. 1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 Texas A&M University 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1998년 (주) 대우중공업 중앙연구소 전자기술실. 2005년~현재 숭실대 전기공학부 조교수. 현재 당 학회 국문지/JPE 편집위원.