http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2013.18.1.37

내부 가습형 연료전지 스택의 출력전압 왜곡 보상기법

구근완[1], 우동균[1], 주동명[1], 이병국†

Compensation Scheme for Output Voltage Distortion in Fuel Cell Stack with Internal Humidifier

Keun-Wan Koo[1], Dong-Gyun Woo[1], Dong-Myoung Joo[1], and Byoung-Kuk Lee†

Abstract – In this paper, the characteristics of portable fuel cell system are introduced and the dynamic response of output voltage of fuel cell stack with internal humidifier is analyzed. When the output of the fuel cell (FC) stack is short-circuited for humidification, the output voltage of the FC stack rapidly drops. In order to maintain the load voltage in the required range, dynamic compensation methods are proposed: 1) installing a capacitor behind the output of the FC stack; 2) utilizing the bi-directional converter. Especially, bi-directional converter is used when short of the FC output is detected or predicted by algorithm using data which is measured during previous three cycles. These methods are simulated by PSIM 9.0, then experimental results from the fuel cell system prototype verify the validity of the proposed methods.

Keywords: portable fuel cell system, bi-directional buck-boost converter, internal humidifier stack, proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)

1. 서 론

연료전지는 화석연료 고갈 및 이산화탄소 규제에 대한 해결책으로 녹색성장에 적합한 신재생에너지원으로 그 가치를 인정받고 있다[1-3]. 이러한 연료전지는 현재 공장 및 의료시설의 백업 전원부터 군용장비에 전원을 공급하는 등의 다양한 장비, 다양한 정격의 시스템에 사용되고 있다. 특히 최근에는 휴대용전원장치에 전원을 공급하기 위해 200[W]미만의 연료전지를 사용하고 있는 추세이다[4]. 이러한 휴대용 전원장치에 사용되는 연료전지 스택의 경우 무게 및 부피를 줄이기 위해 별도의 가습장비를 포함하지 않도록 설계되는 것이 일반적이다[5].

앞서 언급한 가습장비를 포함하지 않는 스택들 중 일부 저가형 스택의 경우 스택 내부에서 자체적으로 membrane에 습도를 유지하기 위해 출력단을 단락시키는 동작을 한다. 단락현상이 발생하게 되면 연료전지 스택은 부하측으로 전원을 공급할 수 없게 되므로 단락구간 동안 시스템의 출력전압이 하강하는 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상이 주기적으로 반복되면 부하에 악영향을 미칠 수 있다[6].

따라서 본 논문에서는 일부 내부가습형 연료전지가 가지고 있는 문제인 가습구간에서 출력전력이 단락되는 현상에 대하여 안정적인 전원을 출력하기 위해 하드웨어적인 보상기법과 제어를 통한 보상기법을 소개하고 실험을 통해 검증한다.

2. 휴대용 연료전지 시스템

휴대용 연료전지 시스템의 경우 부피와 무게 절감을 위해 EMI 필터 및 수동소자의 크기를 줄여야 한다. 이를 위해 시스템의 스위칭 주파수를 높게 가져가야 한다. 이러한 스위칭 주파수는 인덕터와 스위칭 손실의 트레이드오프 점을 고려하여 150[kHz]로 선정하여 설계하였다. 이때 그림 1은 연료전지 시스템을 나타내고 있다. 연료전지 시스템은 연료전지에서 부하로 전력을 공급하는 단방향 컨버터와 연료전지의 느린 동특성을 보완하기 위한 배터리를 활용하는 양방향 컨버터로 구성되어

† Paper number: TKPE-2013-18-1-5 ISSN: 1229-2214
† Corresponding author: bkleeskku@skku.edu, College of Information and Communication Eng., Sungkyunkwan Univ.
Tel: +82-31-299-4581 Fax: +82-31-299-4612
[1] College of Information and Communication Eng., Sungkyunkwan Univ.
Manuscript received Sep. 24, 2012; accepted Nov. 28, 2012
— 본 논문은 2012년 전력전자학술대회 우수추천논문임

Table 1 Specification of system

	uni-direction conv.	bi-directional conv.	
Input voltage [V]	26~46	Step-up	Step-down
		7.5~11	12
Output voltage [V]	12	Step-up	Step-down
		12	7.5~11
Output power [W]	150	80	
SW frequency [kHz]	150	150	
Cooling method	Air cooling	Air cooling	

Table 2 Specification of stack

Fuel cell	PEM
number of cell	48
Power rating	200[W]
Voltage & current rating	28[V]@7.2[A]
Range of output power	26[V]~46[V]
Humidifier	Inner humidifier
consumption of H2	2.8 [L]/[min]
efficiency of Fuel cell	40% @ 28[V] at maximum power

Table 3 Specification of battery

type of battery	$LiFePO_4$
cell weight [g]	496
cell capacity [Ah]	19.6
nominal voltage [V]	3.3

있다[7,8]. 이때 표 1은 시스템의 사양을 나타내고, 표 2는 스택의 사양, 표 3은 배터리의 사양을 나타낸다.

휴대용 연료전지 시스템은 연료전지와 배터리의 상태에 따라 그림 2와 같은 운전 모드와 그림 3과 같은 제어 블록을 갖는다. 이때 연료전지스택의 수소 잔량이 충분하고 연료전지스택의 온도 및 습도가 발전에 적합한 경우를 연료전지스택이 정상인 상태라 하고, 배터리의 SOC가 앞서 설정한 Low limit을 지나친 경우를 충전이 필요한 상태, High limit을 넘는 경우를 충전이 불필요한 상태, Low limit과 High limit의 사이를 배터리 SOC가 안정한 상태라 하자.

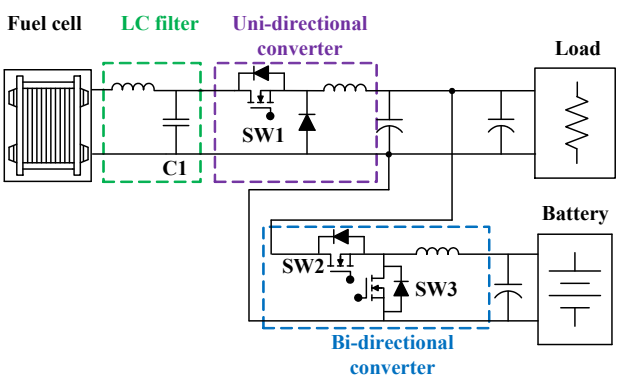


Fig. 1 System configuration of feul cell system

2.2 동작모드

Case 1의 경우 연료전지의 상태가 정상인 상태이고 배터리 SOC가 충전이 필요하지 않은 상태일 때, 연료전지 시스템의 동작은 배터리 충전에 대한 제어를 제외하고 연료전지의 발전만으로 부하에 전력을 공급하면 된다. 따라서 Case 1에서는 단방향 컨버터의 출력전압 제어를 위해 그림 3-(a)와 같은 제어기를 구성하여 단방향 컨버터의 스위치 SW1을 제어해 연료전지의 입력전압을 강압하여 출력전압을 제어한다. Case 2의 경우 연료전지의 상태가 정상인 상태이고 배터리의 SOC가 Low limit 이하인 경우로 배터리를 충전해야하며 부하에 전력을 공급해야한다. 이러한 경우는 연료전지 발전량의 일부를 배터리로 공급하고, 일부는 부하에 공급함으로써 배터리의 충전과 부하에 전압을 공급하기 위해 그림 3-(b)와 같은 제어를 통해 단방향 컨버터의 스위치 SW1과 양방향 컨버터의 벅 스위치 SW2를 모두를 제어해 부하에 정전압을 유지함과 동시에 배터리에 전압을 인가해 충전한다. Case 3의 경우는 연료전지 상태가 정상상태이고 부하가 없는 상태에서의 운전을 나타낸다. 이때는 연료전지 시스템을 그림 3-(b)와 같은 제어를 통해 배터리의 전압만을 제어하여 배터리를 충전하는 모드이다. Case 4번의 경우 연료전지의 상태에 이상이 있고 배터리의 SOC가 High limit과 Low limit사이인 경우로 배터리의

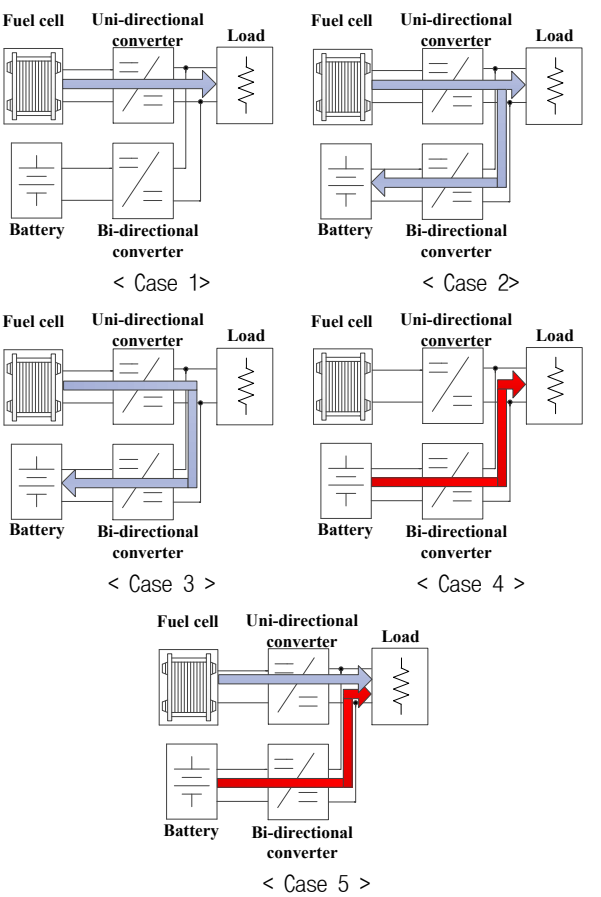


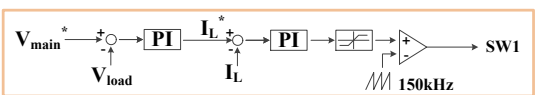
Fig. 2 Operation cases of fuel cell system

전력을 부하에 공급하는 모드이다. 이때 제어기의 구성은 그림 3-(c)와 같이하여 양방향컨버터의 부스트 스위치 SW3을 제어함으로써 배터리의 전원을 양방향컨버터를 통해 승압시켜 부하에 공급한다. 연료전지의 발전만으로 부하가 필요로 하는 전력을 안정적으로 공급하기 힘들고 배터리의 SOC가 충분할 때를 Case 5라 하면, 이때 연료전지시스템은 연료전지와 배터리가 부하를 나누어 분담하도록 운전한다. Case 5에서는 그림 3-(d)에 나타난 제어를 통해 부하에 공급하게 되는 전력을 연료전지와 배터리에서 동시에 감당한다. 이때 출력전압 제어를 위해 양방향 컨버터의 부스트 스위치 SW3은 배터리의 전력을 이용하여 부하의 전압을 제어하고, 메인 벅 컨버터의 스위치 SW1을 전력지령치로 제어해 부하에서 일정부분만을 감당하도록 한다. 메인 벅 컨버터의 출력을 넘어서는 부하의 경우는 양방향 컨버터에서 배터리 전원을 이용해 충당한다.

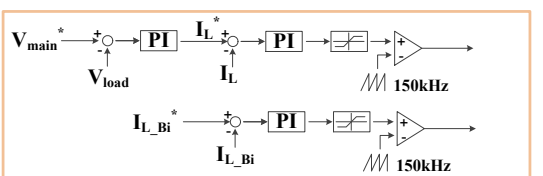
3. 연료전지스택의 출력전압 보상기법

3.1 연료전지 스택의 문제점

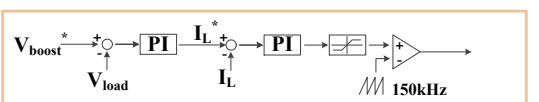
휴대용 연료전지 시스템에 사용되는 스택 중 일부 저가형 모델의 경우 맴브레인 가습을 위해 10[Sec] 주기로 50[msec]동안 출력단을 단락시킨다. 그림 4는 연료전지 스택의 출력을 저항부하에 연결한 후 실험 결과를 나타낸다. 이때 V_FC는 연료전지스택의 출력전압, I_FC는 연료전지스택의 출력 전류를 나타낸다. Area_A는 연료전지의 출력단이 단락현상에 따라 출력전압과 출력전류가 0에 수렴하는 것을 보여준다.



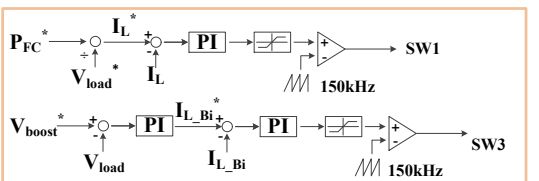
(a) control block of case 1



(b) control block of case 2, 3



(c) control block of case 4



(d) control block of case 5

Fig. 3 Control block for each operation case

3.2 보상 기법

앞서 설명한 스택의 단락 현상이 발생할 경우 시스템이 가지는 출력전압 외곡현상을 보상하는 방법에는 하드웨어를 이용하는 방법과 제어기법을 통해 보상하는 방법이 있다. 이러한 제어기법에는 감지기법과 예측기법이 있다.

3.2.1 하드웨어를 이용한 보상기법

하드웨어를 사용해 보상하는 방법은 에너지 저장 소자를 사용해 연료전지의 단락구간동안 부하에서 필요로 하는 에너지를 공급하는 방법이다. 이를 위해서는 그림 1의 커패시터 (C1)에 저장된 에너지가 부하에서 소비하는 에너지보다 커야한다. 부하에서 150[W]의 에너지를 소비한다고 가정하면, 커패시터에서 연료전지 출력단 단락구간 50[msec]동안 공급해야하는 필요한 에너지를 E_supply 이라 할 수 있다. 이때 컨버터의 효율을 90[%]라 가정 할 경우 손실을 고려해 부하에 공급해 주어야 하는 에너지는 E_real 이라 할 수 있다. 이때 E_real 값은 다음 식 (1)과 같이 구해진다.

$$E_{real} = E_{supply} \times t/\eta = 150/0.05/0.9 = 8.6[J] \tag{1}$$

이러한 양의 에너지를 공급하기 위해서는 연료전지시스템의 입력전압과 부하로 출력되는 전압의 관계를 고려하여 필요한 커패시터의 용량을 산정하면 필요한 커패시턴스는 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$C = \frac{E_{real} \times 2}{V_{in}^2 - V_{out}^2} = \frac{8.6 \times 2}{(30^2 - 12^2)} = 22.75[mF] \tag{2}$$

이때 V_in은 연료전지시스템의 입력전압, V_out은 출력전압을 나타낸다. 앞서 구해진 커패시턴스를 충족시키기 위해 사용될 수 있는 커패시터의 종류는 전해커패시터와 슈퍼커패시터가 있다. 전해커패시터를 사용할 경우 시스템의 부피가 크게 커지는 것을 피할 수 없고, 슈퍼 커패시터를 사용할 경우에는 시스템의 가격이 대폭 상승하게 된다.

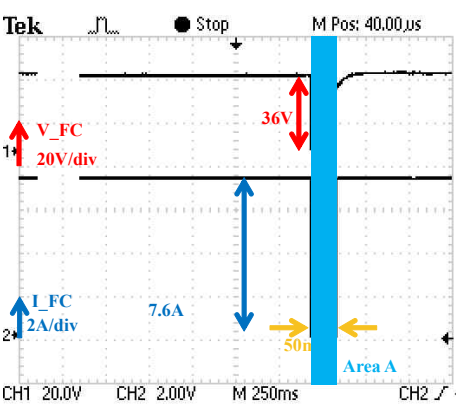


Fig. 4 Waveform of fuel cell

3.2.2 제어를 통한 보상기법 A (감지기법)

제어기법을 통해 연료전지의 출력전압을 보상하는 방법 중 감지기법에 해당하는 방법은 그림 5와 같다. 연료전지의 출력전압을 감지한 신호가 일정 기준치 이하가 되면, 양방향 컨버터를 부스트 모드로 동작시켜 배터리의 전원을 부하로 공급한다. 즉, 연료전지 출력전압 단락현상에 영향을 받는 운전모드 case 1과 case 2등으로 운전하던 연료전지 시스템이 연료전지의 단락현상을 감지하면 case 4로 운전하여 연료전지의 단락현상이 부하에 영향을 미치지 못하도록 양방향컨버터를 통해 출력전압을 보상하게 된다.

3.2.3 제어를 통한 보상기법 B (예측기법)

예측기법을 이용해 출력전압을 보상하는 방법은 그림 6와 같이 수행된다. 연료전지스택의 단락주기와 단락되는 시간에 대한 데이터가 없기 때문에 예측기법을 사용하기 위해서는 우선 감지기법으로 연료전지시스템을 동작시켜 데이터를 확보해야 한다. 데이터를 확보하는 구간동안은 감지기법을 사용하여 연료전지스택의 출력전압이 일정치 이하가 되면 Case 4의 경우와 같이 배터리의 전원을 양방향컨버터를 사용해 승압시켜 부하에 전원을 공급한다.

연료전지의 단락주기와 단락되는 시간에 대한 데이터를 얻기 위해 감지기법이 적용되는 동안 연료전지의 스택이 정상인 상태에서는 cont_A_0를 증가시키며 연료전지가 정상상태인 구간의 시간을 측정하는데 사용한다. 이후 스택이 단락현상을 보이면 감지기법을 통해 시스템의 출력전압을 보상한다. 이후 다시 연료전지의 출력전압이 정상인 구간이 되면 cont_A_1을 증가시키며 정상상태의 시간을 측정한다. 이후 세 번째로 연료전지가 단락현상을 보일 경우 감지기법을 적용하여 출력전압을 보상하고, 연료전지의 출력이 정상이 되었을 때는 cont_A_2를 카운트하며 앞서 측정된 cont_A_0와 cont_A_1의 평균값을 cont_B로 지정하고 cont_B에서 일정한 값을 뺀 cont_B_1을 감소시킨다. 이렇게 감소한 cont_B_1이 0보다 작아지는 순간 양방향 컨버터와 배터리를 통해 출력전압을 보상하는 보상기법을 예측기법이라 한다. 예측기법으로 보상하게 되는 시점은 연료전지의 단락현상 이전이 된다. 이렇게 보상된 이후 연료전지 스택이 정상상태가 되면 cont_A_1과 cont_A_2의 평균을 cont_B로 지정하고 cont_B에서 일정한 값을 뺀 cont_B_1을 감소시킨다. 감소되던 cont_B_1이 0이 되는 시점에서 양방향컨버터는 다시 시스템을 예측기법으로 동작하게 된다.

이러한 과정을 계속 되풀이 하여 예측기법으로 연료전지의 출력전압을 보상하게 된다면 항상 연료전지의 출력전압 단락현상보다 앞선 시점에서 출력전압을 보상할 수 있게 된다. 따라서 예측기법으로 시스템을 동작시킬 경우 감지기법으로 동작된 시스템이 연료전지의 출력전압을 감지하여 연료전지의 단락현상을 감지하고 보상을 위해 동작하기까지의 구간동안, 감지기법으로 보상하지 못했던 구간에 대해서 보상할 수 있게 된다.

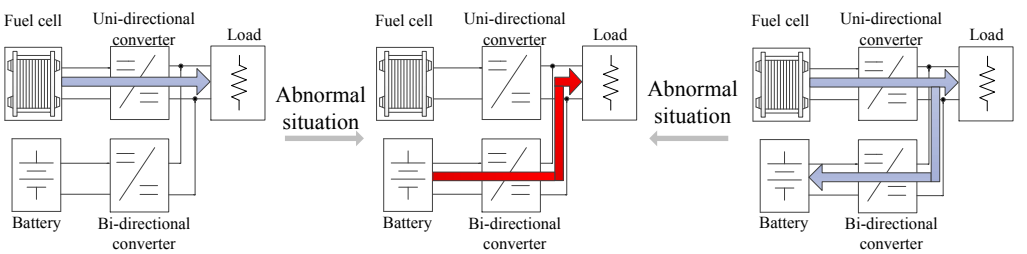


Fig. 5 Concept of detecting methode

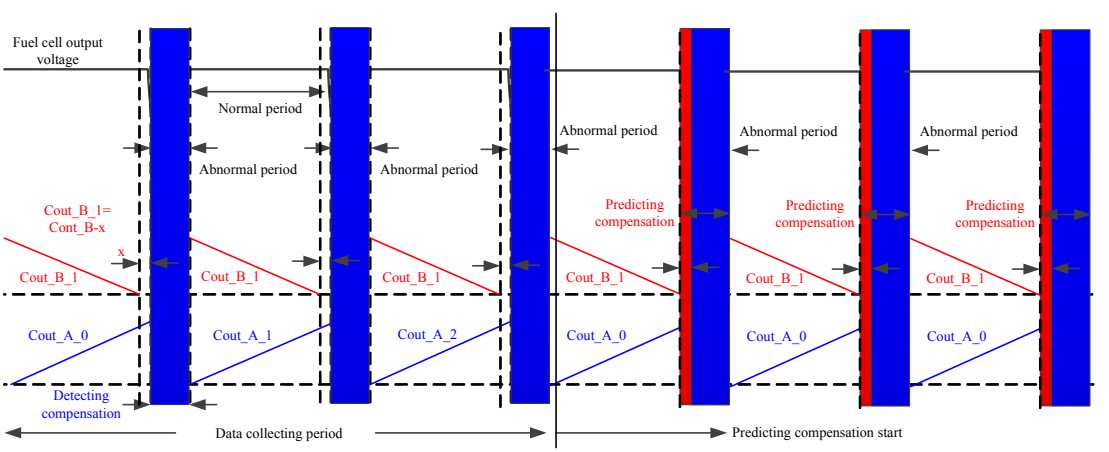


Fig. 6 Concept of predicting compensation method

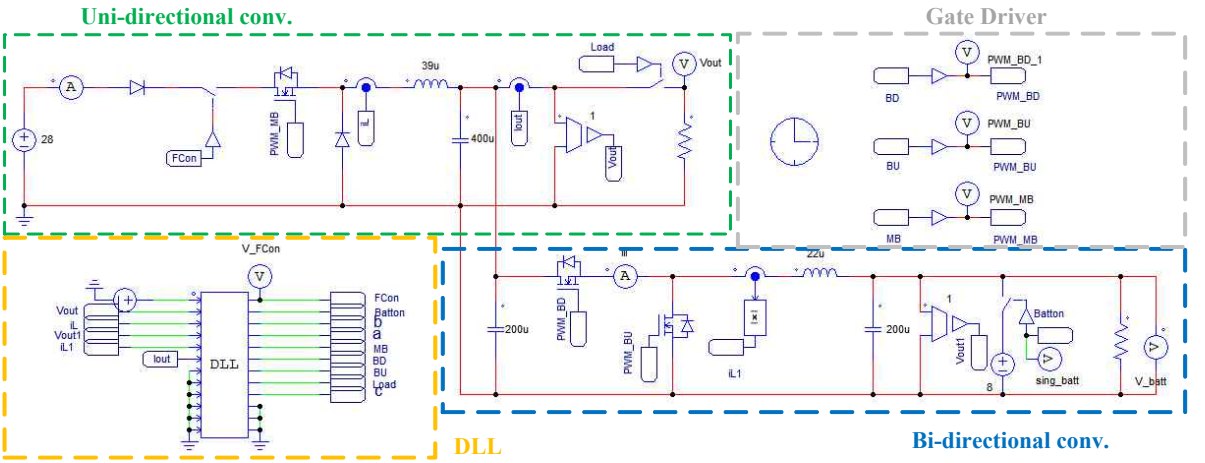


Fig. 7 Simulation platform

4. 시뮬레이션

앞서 제안하였던 보상기법의 동작과 타당성을 검증하기 위해 PSIM 소프트웨어를 사용해 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 7은 시뮬레이션 회로도를 나타낸다. 시뮬레이션의 구성은 단방향 컨버터와 양방향 컨버터, 그리고 DLL로 구성되어있다. 연료전지의 단락현상을 모의하기 위해 DLL 블록과 양방향스위치를 사용해 50[ms]의 시간동안 전원을 단방향컨버터로부터 분리하였다. 배터리의 경우 역시 직류전원을 사용하였으며 연료전지의 단락구간과 상보적으로 양방향컨버터에 전원을 공급하도록 모델링하였다. 그림 8은 연료전지의 단락구간동안 출력전압이 하강하는 모습을 나타내고, 그림 9는 커패시터를 이용해 출력전압을 보상한 경우로 이때 사용된 커패시턴스는 23[mF]이다. 연료전지의 출력단 단락현상이 발생하면 커패시터에 저장되어 있던 에너지를 활용해 출력전압을 유지하려는 것을 볼 수 있었으나, 커패시터가 방전됨에 따라 출력전압이 시정수 곡선에 따라 하강하는 것을 볼 수 있었다. 그림 10의 경우는 배터리와 양방향컨버터를 이용한 출력전압 보상기법이고, 그림 11의 경우는 예측기법이 사용되는 경우의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 양방향컨버터와 배터리를 이용한 보상방법 역시 시스템 출력전압을 보상함에 있어 효과가 있다.

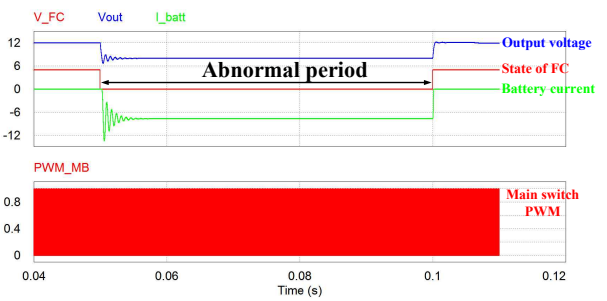


Fig. 8 Uncompensated simulation waveform

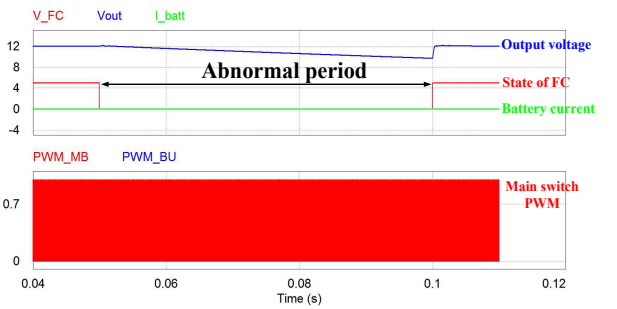


Fig. 9 Compensation simulation waveform with capacitor

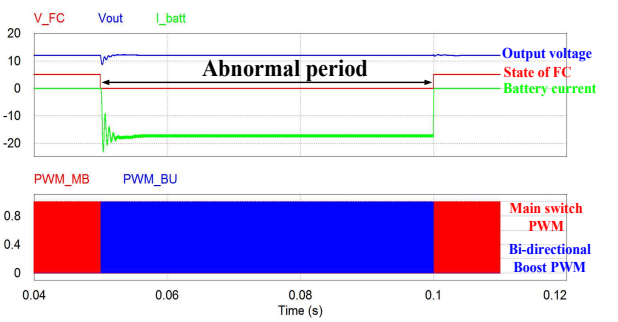


Fig. 10 Compensation simulation waveform with detecting control methode

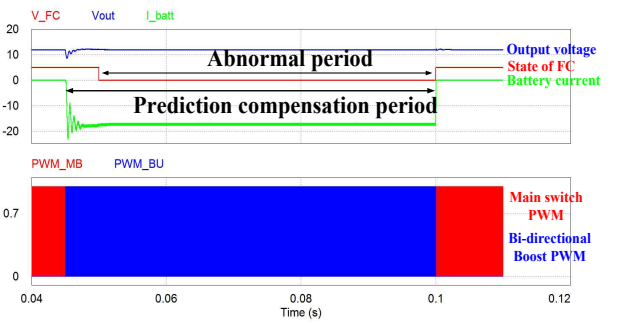


Fig. 11 Compensation simulation waveform with predicting control methode

5. 실험 결과

제안한 보상기법의 검증을 위해 다음과 같은 하드웨어를 제작하여 실험을 진행하였다. 단방향 컨버터로는 벅 컨버터를 사용했고, 양방향 컨버터로는 케스케이드 벅 부스트 컨버터를 사용하였다. 보상커패시터는 단락현상 보상을 위한 값인 23[mF]의 커패시턴스를 충족시키기 위해 병렬로 연결하였으며 컨트롤러는 TI사의 DSP320F28035를 사용하였다.

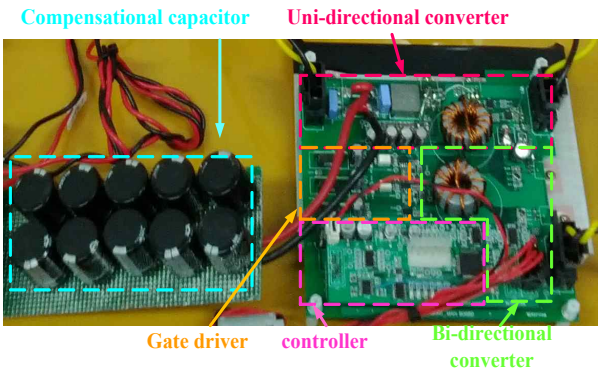


Fig. 12 Hardware set

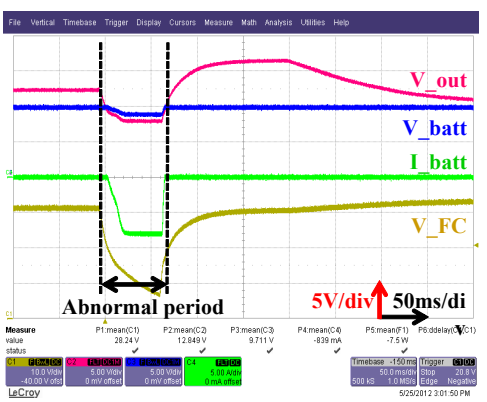


Fig. 13 Uncompensated waveform

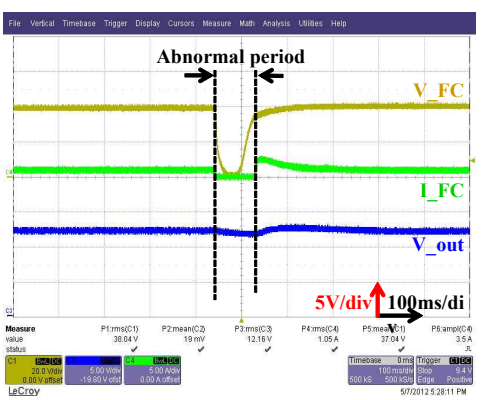
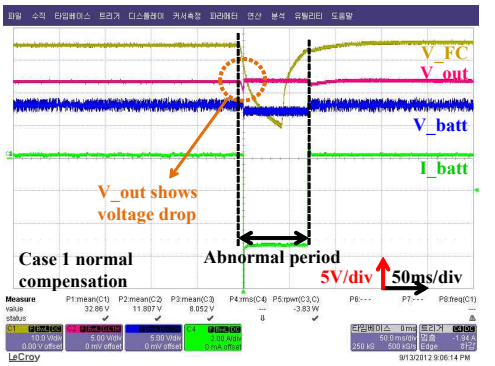
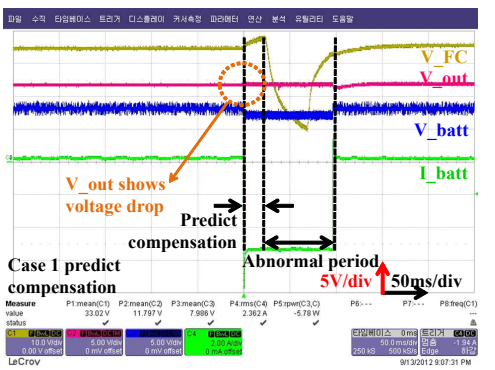


Fig. 14 Compensation waveform with capacitor

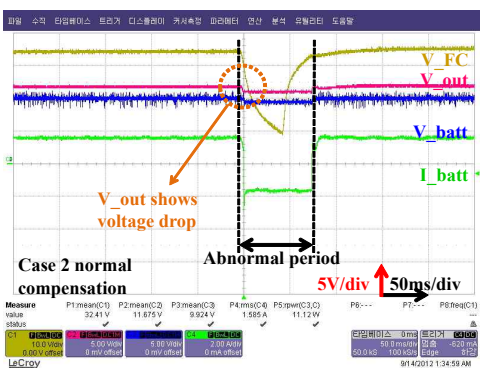


(a) Detecting compensation waveform

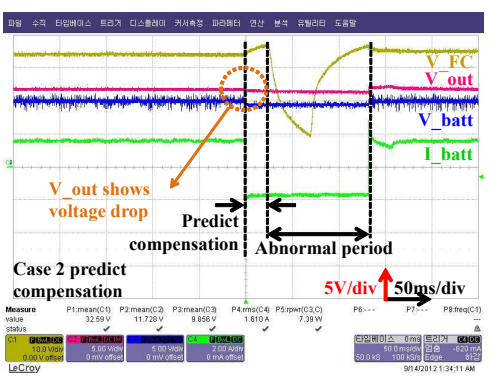


(b) Predicting compensation waveform

Fig. 15 Waveform of case 1



(a) Detecting compensation waveform



(b) Predicting compensation waveform

Fig. 16 Waveform of case 2

보상기법은 그림 2에 나타난 운전모드 중 배터리의 전원을 출력전압으로 사용하지 않는 경우, 즉 연료전지의 전원만으로 부하에 전원을 공급하는 경우에 있어서 필요하게 된다. 따라서 case 1, case 2의 경우에 대하여 보상기법을 적용하여 실험을 진행함으로써 보상기법이 가지는 효용성에 대해 확인한다. 그림 13~16에서 V_FC, I_FC, V_out, V_batt, I_batt는 각각 연료전지의 출력전압, 연료전지의 출력전류, 시스템의 출력전압, 배터리의 출력전압, 배터리의 전류를 나타낸다. 그림 14에서는 case 1 운전에 대하여 커패시터를 활용해 그림 13에서 보여지는 출력전압의 왜곡현상을 보상하였다. 그림 15-(a)의 경우 case 1에 대하여 예측기법을 활용해 보상하기 전에 단순히 출력전압의 하강만을 감지하여 출력전압을 보상한 경우이고, 그림 15-(b)의 경우 case 1에 대하여 예측기법이 사용됨에 따라 연료전지의 단락현상 이전에 출력전압을 보상하는 경우이다. 이때 그림 15-(b)의 경우에서는 그림 15-(a)의 경우와 다르게 연료전지의 단락현상 발생으로부터 감지하기까지의 시간에 대해 제어가 가능하기 때문에 V_out의 전압 강하 현상이 적어 시스템의 출력전압을 보다 안정적으로 공급할 수 있는 장점이 있다. 그림 16-(a)의 경우 case 2에 대하여 예측기법이 적용되기 전의 파형이고, 그림 16-(b)의 경우는 예측기법이 적용된 파형이다. 그림 16의 경우도 마찬가지로 그림 15의 경우와 같이 예측기법이 적용되는 순간의 파형이 예측기법이 적용되지 않는 구간의 파형보다 V_out의 강하 현상이 적어 안정적임을 보여준다.

6. 결 론

본 논문에서는 일부 내부 가습형 연료전지 스택이 가습구간 동안에 스택의 출력전압을 단락시키는 현상이 발생할 때, 연료전지 시스템의 출력전압을 보상하기 위한 방법들을 제안하고 실험을 통해 이를 검증하였다. 제안된 방법 중 하드웨어를 사용한 방법과 제어를 통해 출력전압을 보상하는 방법 모두 시스템 출력전압을 보상하는 것에 효과가 있었다. 그러나 하드웨어를 통한 보상 방법의 경우, 출력전압 보상을 위해 큰 용량의 커패시터가 필요하게 되고 이는 전체 시스템의 부피와 무게, 가격 등을 증가시키는 요인이 된다. 반면 제어를 통한 보상방법 중 감지 기법이 사용되는 경우는 커패시터에 비해 시스템의 부피, 무게, 가격을 유지하면서 시스템의 출력전압을 보상 할 수 있다. 하지만 감지 기법의 경우 연료전지의 출력전압을 감지하기까지의 시간동안 제어가 불가능한 단점이 있다. 예측기법이 사용되는 경우는 기존 시스템 유지 및 감지 기법의 단점을 보완할 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20113010030020-12-2-200)

참 고 문 헌

[1] J. L. Dicks, “Fuel cell system explained,” 2nd ed. Hoboken, NJ, 2010.

[2] Wei Jiang, Babak Fahimi, “Active Current Sharing and Source Management in Fuel Cell-Battery Hybrid Power System,” *IEEE Transactions on Indurstrial Electronics*, Vol. 57, No. 2, Feb. 2010.

[3] Dpmg-Hee Kim, Jong-Soo Kim, Gyu-Yeong Choe, Byoung-Kuk Lee, and Cheol-Hoon Kawk, "Design and Control Method for Critical Load Supply Equipment using MCFC Electricity Generation Systems," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 16, No. 1, pp. 20-29, Feb. 2011.

[4] Yu Ruan, Yumei Wen, Ping Li, Weidong Shen, "Design of Control Methods for a Portable PEMFC Power System," *Intelligent control and automation 2008. WCICA 7th World congress on*, pp. 7874-7878, June. 2008.

[5] P. Sridhar, Ramkumar Perumal, N. Rajalakshmi, M. Raja, K. S. Dhathathreyan, "Humidification studies on polymer electrolyte membrance fuel cell," *Journal of power sources*, pp. 72-78, Jan. 2001.

[6] N. G. Hingorari "High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse," *Spectrum IEEE*, April. 1996.

[7] J. Hamelin, K. Agbossou, A. Laperriere, F. Laurencelle, and T. K. Bose, "Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 26, No. 6, pp. 625-629, Oct. 2001.

[8] Woong-Hyub Song, Jae-Hun Jung, Jin-Young Kim, Eui-Cheol Nho, In-Dong Kim, Heung-Geun Kim, Tae-Won Chun, "Supercapacitor Energy Storage System for the Compensation of Fuel Cell Response Characteristics," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 16, No. 5, pp. 440-447, Oct. 2011.

구근완(丘根完)

1989년 2월 10일생. 2011년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정.

우동균(禹東均)

1984년 7월 29일생. 2009년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2012년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.

주동명(朱東明)

1988년 10월 9일생. 2011년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정.

이병국(李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공박). 2002년~2003년 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년~2005년 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자그룹 선임연구원(팀장). 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 부교수. 2004년~현재 IEEE Senior Member, IEEE VPPC2012 General Chair. 당 학회 국제이사.