

7kW 연료전지용 DC/DC 컨버터 설계

김가인¹, 신민호², 이정효[†]

DC/DC Converter Design for 7kW Fuel Cell

Ga-In Kim¹, Min-Ho Shin², and Jung-Hyo Lee[†]

Abstract

This study proposes a design method of fuel cell DC/DC converter using in 5-ton forklift. For efficient hydrogen usage, targeted fuel cell system recirculates discarded hydrogen after fuel cell reaction. Recirculating hydrogen contains much impurities that reduces output power, increasing pressure that can damage the internal fuel cell reaction system. The proposed DC/DC converter effectively converts fuel cell power considering the voltage drop rate to reflect the recirculating hydrogen. Then, frequency control method is used to regulate the current ripple amount for battery and fuel cell hybrid configuration. Proposed power converter system design and control methods are verified in a practical fuel cell system that implements recirculating hydrogen.

Key words: Fuel cell system, Fuel cell-battery hybrid system, Fuel cell system for forklift

1. 서 론

최근 전 세계적으로 대기오염 및 환경오염이 심해짐에 따라 현재 지구온난화가 심각한 문제로 대두되고 있다. 일상생활에서 흔히 쓰이는 에너지원 중 하나인 화석연료의 소비는 증가하지만 유한하며, 화석연료의 연소과정에서 대기오염이 발생하게 된다. 따라서 신재생 에너지원 중 배터리와 연료전지가 주목받고 있다^{[1]-[3]}. 기존의 배터리는 화석연료를 사용하여 생산된 전기로 충전하는 방식이었으나, 연료전지는 수소와 대기 중의 산소의 화학반응으로 전기를 생산하는 발전장치이기 때문에 화석연료의 연소과정 없이 대기오염이 발생하지 않고, 전기, 물, 열에너지만 발생하게 되어 배터리보다 친환경적이고 에너지 손실이 적다^{[2],[3]}. 또한, 연료전지에 공급되는 공기는 발전과정 중 정화된 후 배출되기 때문에 환경오염 저감 대책으로 채택되고 있어 이동수단에도

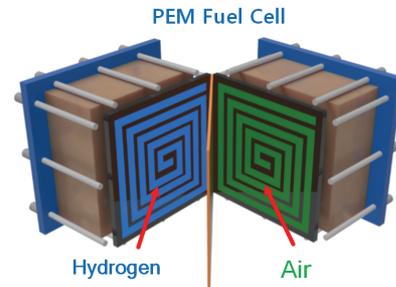


Fig. 1. PEM Fuel cell structure.

탑재되는 등의 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다^[1].

그림 1은 압축 수소를 전해질로 사용하는 저온형 연료전지인 고분자전해질 연료전지(PEMFC)의 구조를 나타낸다. PEMFC는 부하변동에 따라 출력전압이 가변되기 때문에, 일반적으로 DC/DC 컨버터를 사용하여 일정한 출력전압을 유지시킨다. 본 논문은 PEMFC용 DC/DC 컨버터의 효율 향상을 위한 컨버터 설계 방법과 제어 방법을 제안한다. 기존의 PEMFC 구동용 고효율 DC/DC 컨버터의 설계 및 제어방법은 다음과 같은 연구가 이루어져 왔다.

먼저 고전압 출력을 위한 높은 승압비를 유지하면서도 효율을 향상시키기 위한 2-step DC/DC 컨버터 구조를 사용한 연구가 발표되었다^{[4],[5]}. 이런 방법은 연료전지용 DC/DC 컨버터의 부피가 커지는 단점이 있다. 한편, 변압기를 활용한 연료전지용 DC/DC 컨버터의 연구도 진행됐다^{[6]-[9]}. 이러한 DC/DC 컨버터는 Zero-Voltage Zero

Paper number: TKPE-2022-27-2-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jhlee82@kunsan.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Kunsan National University, Korea
Tel: +82-63-469-4707 Fax: +82-63-469-7431

¹ Div. of Electrical Engineering, Kunsan National University, Korea

² APEL Co., Ltd., Korea

Manuscript received Oct. 20, 2021; revised Nov. 2, 2021; accepted Dec. 29, 2021

— 본 논문은 2021년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2021년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

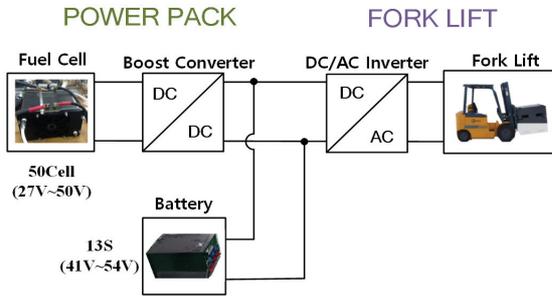


Fig. 2. Forklift fuel cell system configuration.

Current Switching(ZVZCS)을 PWM 주파수를 이용하여 비교적 쉽게 구현이 가능하지만, 저주파 변압기를 사용하므로 변압기의 부피가 커지는 단점이 있다^[9]. 본 논문은 PEMFC의 출력전류에 따른 전압강하를 보상하면서도 고효율의 전력변환이 가능한 DC/DC 컨버터의 설계 및 제어방법을 제안한다. 이를 위해 PEMFC의 활성화 반응 손실과 내부저항 손실에 의해 버려지는 수소를 재순환할 수 있는 제어 알고리즘과, 배터리를 통한 하이브리드 시스템 구성을 통해 고효율 동기식 부스트 컨버터 설계 방법을 제안한다.

2. 연료전지 시스템 구성

그림 2는 본 논문에서 사용된 연료전지 지게차 구동을 위한 PEM 연료전지, 배터리 하이브리드 시스템의 구성을 나타낸다. 연료전지 스택과 Boost Converter의 용량은 7[kW]이고 배터리는 리튬 폴리머 배터리를 13개 직렬연결하였고, 용량은 200[Ah]로 10[kWh]의 용량을 갖는다. 5톤급 지게차에 장착된 인버터는 구동과 리프팅이 동시에 동작될 때 요구되는 전력은 최대 40[kW]이고 48[V] 기준으로 850[A]의 전력이 요구되어 연료전지에서 발생된 전력과 배터리가 하이브리드 동작한다. 이때 연료전지의 최대 출력 전류 200[A]에서 부스팅 되어 110[A]를 출력하고 배터리에서 740[A]를 출력하여 배터리에서는 4[C-rate]에 가까운 전력을 방전하여 배터리는 5[C-rate]까지 방전 가능한 고방전 셀을 적용하였다.

2.1 PEM 연료전지 스택

그림 3은 연료전지 전압, 전류 특성 곡선을 나타낸다. 연료전지 셀은 온도에 따라서 셀 초기 전압을 갖는다. 이상적인 온도는 700[°C]에서 최대 전압인 셀당 1.2[V]를 갖고 온도에 따라서 전압은 강해진다. 이동수단에 연료전지를 사용할 경우 빠른 시동이 요구되어 30초 이내에 도달할 수 있는 온도인 60[°C]에서 사용되고 동작 중에 최대 100[°C]까지 올라서 연료전지의 효율을 높인다. 활성화 반응 후 스택 전압은 내부 저항값에 의해 전류에 따른 IR 곡선을 그리며 비례적으로 감소하고 수소와 산소의 반응에 의한 최대 출력전력을 초과하면 항복

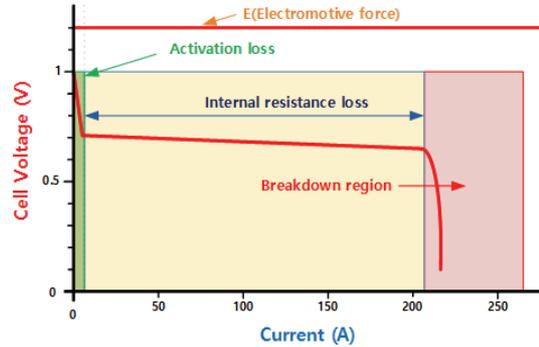


Fig. 3. Voltage, current curves of PEM fuel cell stack.

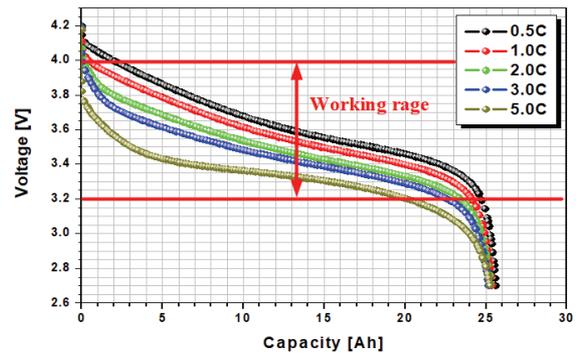


Fig. 4. Operation area of Lithium-Polymer battery.

영역에 도달하게 되어 연료전지 스택의 분리막에 압력이 상승하여 연료전지가 바로 파손되는 현상이 있어 연료전지 시스템에서는 수소와 산소가 반응한 전력의 95[%]까지만 사용하여 연료전지 스택을 보호한다.

2.2 리튬 폴리머 배터리팩

직렬형 연료전지-배터리 하이브리드 시스템에서 주 동력의 전력은 연료전지에서 사용되고, 부족한 전력은 배터리에서 방전하여 하이브리드로 동작한다. 연료전지 지게차에서 요구되는 순간 높은 전력을 위하여 고방전 셀이 요구되어 5[C-rate] 방전이 가능한 배터리를 13개 직렬 연결하고 8개 병렬 연결하여 13S, 8P의 배터리팩을 제작하였다. 배터리의 안정성을 확보하기 위하여 사용 가능한 영역보다 최고, 최저전압에 0.2[V] 마진을 두어 선형적인 방전 곡선 부분을 최대한 사용하였고, 과충전, 과방전에 대한 보호를 사용영역을 줄여서 보호하였다. 사용된 배터리는 그림 4와 같이 사용 C-rate에 따라서 용량이 다른 것을 확인할 수 있다. 일반적인 동작에서는 연료전지와 하이브리드로 동작하여 0.5[C-rate] 이하에서 방전되고 지게차에서 5톤 무게의 리프팅이 요구될 때는 최대 5[C-rate]인 800[A]까지 방전을 안정적으로 할 수 있다. 배터리의 셀 온도는 1[C]에서 3[C]까지는 최대 포화점이 50[°C]로 평균온도 상승이 25[°C] 미만이고 최대 출력은 5[C-rate]에서는 7분 만에 최대 온도수치인 65[°C]에 도달하나, 지게차 운전 특성상 최대 방전이 30초 이내로 안정 범위 내에 사용할 수 있다. 배터리

의 보호를 위하여 BMS를 장착하여 과전압, 저전압, 과전류, 온도에 따라서 릴레이를 이용하여 차단할 수 있게 하였다.

3. 제안하는 연료전지용 DC/DC 컨버터 설계

Boost converter는 식 (1)과 같이 한 주기 동안 인덕터 전압값의 합이 0이 된다.

$$V_L = V_{IN} \times D + (V_{IN} - V_{OUT}) \times (1 - D) \quad (1)$$

$$0 = V_{IN} \times D + (V_{IN} - V_{OUT}) \times (1 - D)$$

D(Duty Cycle)는 1보다 작은 값을 갖는다. 따라서 식 (2)와 같이 출력전압의 값은 항상 입력전압보다 큰 값을 가지므로 승압 시에는 Boost converter를 사용한다.

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{1 - D} \quad (2)$$

일반적인 Boost converter에서 도통손실은 다음과 같이 정의된다. 먼저, 스위치의 한 주기 전체 손실은 식 (3)과 같다.

$$P_{loss} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{SW} i_{SW} dt = P_C + P_{SW} \quad (3)$$

T는 스위칭주기, v_{SW} 는 스위치 순시전압, i_{SW} 는 스위치 순시전류, P_C 는 도통손실, P_{SW} 는 스위칭손실을 나타낸다. 도통손실은 식 (4)와 같이 턴온저항에 의한 손실과 순방향 전압강하 손실의 합으로 표현할 수 있다.

$$P_C = P_{r_{SW}} + P_{VF} \quad (4)$$

$$P_{r_{SW}} = r_{SW} \times I_{SWrms}^2$$

$$P_{VF} = V_F \times I_{SWavg}$$

$P_{r_{SW}}$ 는 턴온저항에 의한 손실, P_{VF} 는 순방향 전압강하손실을 나타낸다. r_{SW} 는 턴온저항, I_{SWrms} 는 스위치전류의 실효값, V_F 는 순방향 전압강하, I_{SWavg} 는 스위치전류의 평균값을 나타낸다. 여기서 일반적으로 다이오드에 의한 순방향 전압강하 값보다 MOSFET의 순방향 전압강하 값이 작기 때문에 MOSFET을 사용하는 것이 도통손실이 적다.

그림 5는 제안하는 연료전지용 DC/DC 컨버터의 회로도 및 DSP 제어기의 블록도를 나타내고, 그림 6은 제안하는 연료전지용 DC/DC 컨버터 각 스위치의 동작모드 및 전압, 전류 파형을 나타낸다. 토폴로지는 동기식 부스트 컨버터를 적용하였고, 입력 전압, 전류와 출력 전압, 전류를 센싱한다. 입력은 PEMFC 셀 50셀로 적층하여 무부하전압 50[V]에서 최대 출력인 200[A]일 때 30[V]이고, 25[V] 이하에서는 연료전지 스택을 보호하기

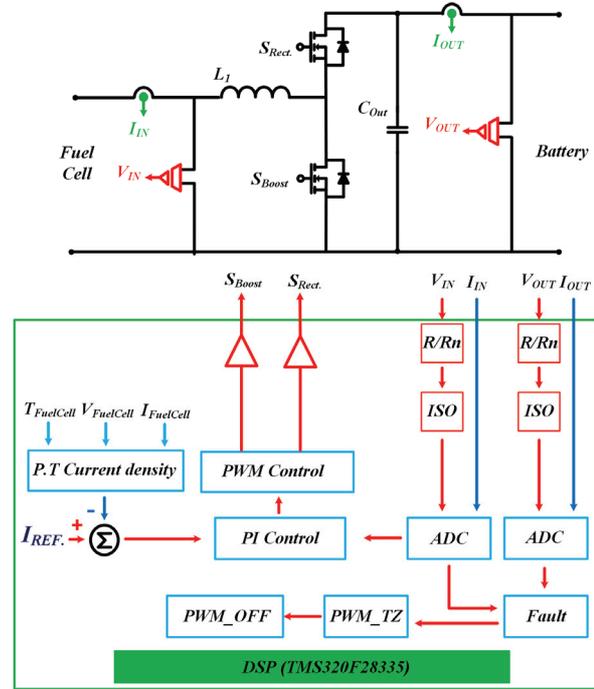


Fig. 5. Circuit configuration of proposes DC/DC converter.

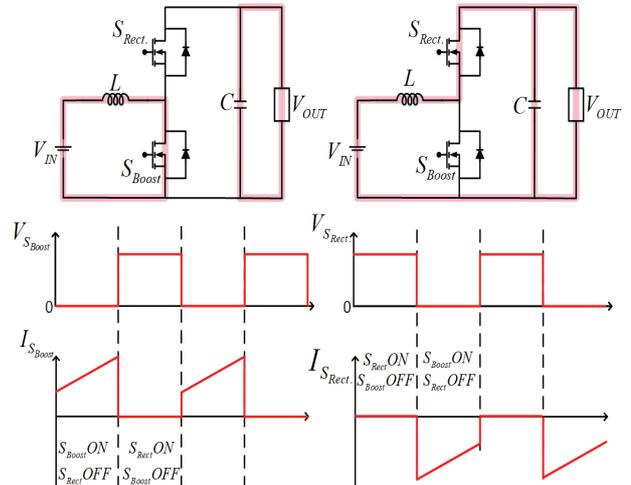


Fig. 6. Operation mode of proposes DC/DC converter.

위하여 Fault 처리한다. 출력은 리튬 폴리머 배터리 셀 13개를 직렬연결하여 최저 41.6[V]에서 최대 54.6[V]이다. 하이브리드 시스템 특성상 연료전지는 지속적으로 동작되어 배터리 SOC가 60[%] 미만으로 감소하지는 않아 최종 출력전압은 45[V] 미만으로 감소하지는 않는다. 컨버터의 최대전력은 7[kW]이고, 연료전지의 정전류 방전이 요구되어 컨버터는 출력전압, 입력전류제어로 동작하게 된다. 일반적으로 이동형 전동 동력 시스템은 무게를 저감하기 위한 노력을 많이 하지만 EV와 다르게 전동지게차는 리프팅을 하기 위한 기본 무게가 있어 기존의 납 배터리를 사용한 무게와 동일 무게가 요구되어 컨버터를 설계할 때는 공간대비 많은 중량이 발생할 수

있도록 재질 등을 선정하고 공간 내부를 최대한 활용하여야 한다.

연료전지 시스템은 시스템 내부에 산소통이 들어가고 산소통은 부피대비 무게가 높지 않아 배터리와 연료전지용 컨버터에서 최대의 무게를 발생하여야 되어 케이스 재질 또한 알루미늄이 아닌 철 재질을 사용하여 무게를 증대시켰다. 또한, Busbar의 두께도 200[A]급이 아닌 공간이 되는 최대한 두께로 선정하여 발생하는 열도 줄이면서 무게도 늘리는 방법을 사용하여 컨버터의 최종무게를 17[kg]으로 설계하였다.

3.1 DSP 제어기 설계

그림 7은 DSP 제어기의 제작 사진을 나타낸다. DSP 제어기는 TI사의 TMS320F28335를 사용하였고, RS-232 통신을 통하여 컨버터의 정보를 모니터링할 수 있게 하였다. DC 팬의 On/Off를 위하여 Relay 컨트롤하는 GPIO와 IM01의 Relay를 사용하였다. 전압은 절연 DC/DC와 절연형 OPAMP를 사용하여 신호 절연을 하여 외부의 높은 전압에 의한 파손을 방지하였고, 비 절연형 컨버터 특성상 공동 그라운드를 사용하여 OPAMP의 공급되는 절연 전원은 입력전압과 출력전압 공통으로 적용하였다. 전류는 LEM사의 HAS200의 전류센서를 사용하여 전류센서에 +15[V], -15[V] 전원공급을 할 수 있도록 핀에 전원단을 추가하였고, CAN 통신을 이용하여 배터리팩의 BMS와 연료전지 시스템의 통합제어기와 통신할 수 있도록 구현하였다.

3.2 Gate Driver 설계

그림 8은 Gate Driver Unit 제작 사진을 나타낸다. GDU는 PWM 의 배터리와 연료전지 전압을 센싱 받아 분배 저항을 통하여 분배하여 DSP에 전압을 공급하여 주고, DSP 제어기의 PWM 신호를 받아 MOSFET의 스위칭이 가능한 전력으로 변환하여 준다. GATE의 DC/DC는 1[W]급의 절연형 모듈을 사용하였고, 배터리의 변동되는 전압을 정전압으로 출력할 수 있는 30[W]급의 DC/DC와 24[V] 전압을 DSP에 5[V], +15[V], -15[V]를 공급할 수 있는 절연형 DC/DC를 추가하였다.

3.3 전원장치 하드웨어 설계

그림 9는 본 논문에서 제안하는 연료전지용 7[kW] DC/DC 컨버터 제작 사진을 나타낸다. 입력은 100[V]의 200[A] 2단 EMI 필터를 설계하여 사용하였다. 연료전지에서 화학반응에 의한 전도 노이즈 레벨이 고주파 범위에서 높아 1단에서는 EMI 실험을 통과할 수 없기 때문에 2단으로 적용하였다. Boost Reactor는 주파수를 많이 높일 수 없고 L값을 충분히 가져가기 위하여 페라이트보다 무게를 더 높일 수 있는 철심 코어를 적용하였다. 리액터는 200[A]의 전류에 180[uH]의 리액턴스를 가질

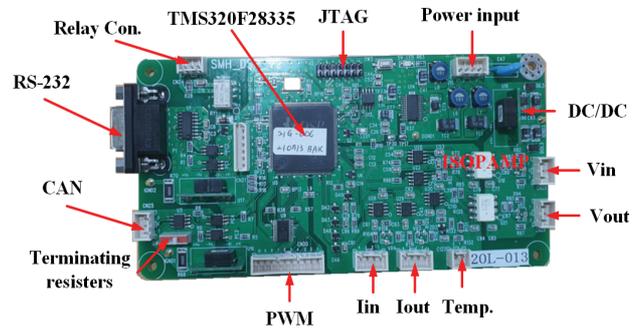


Fig. 7. DSP controller.

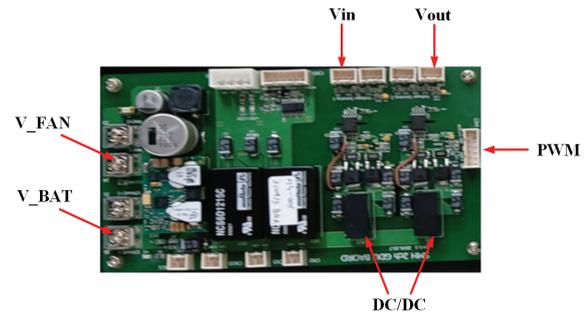


Fig. 8. GATE driver unit.

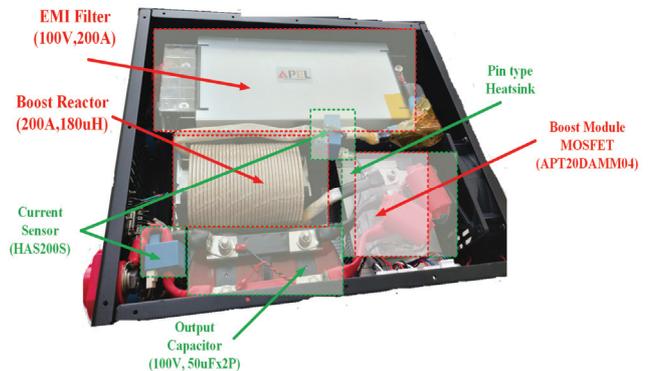


Fig. 9. DC/DC converter for 7 kW fuel cell.

수 있게 설계하였고 부스트 Reactor의 특성상 포화가 쉽게 발생할 수 있어 코어의 갭을 3[mm] 주어 포화를 방지하였다. 스위칭 소자는 ADVANCED POWER TECHNOLOGY MOSFET Power Module의 200[V] 내압에 372[A]의 전류용량이 같은 스위치가 2개 포함된 하프팩의 스위칭 소자를 사용하였다. 커패시터는 기존에 ICEL사의 PHC 400[V], 10[uF]의 제품을 10개 병렬 연결하여 사용하였으나, 병렬 연결된 10개의 커패시터에서 서로 다른 임피던스가 발생되어 스위치와 가까운 앞단에서 전류용량 부족에 의한 온도 상승으로 화재가 발생하여 커패시터 하나당 150[A]의 전류용량을 갖는 AVX사의 FFVE 410107K 커패시터를 2개 병렬 연결하여 사용하였다. 부스트 컨버터를 충전기로 사용할 경우 출력 커패시터는 배터리와 연결되어 C값이 큰 경우 배터리의

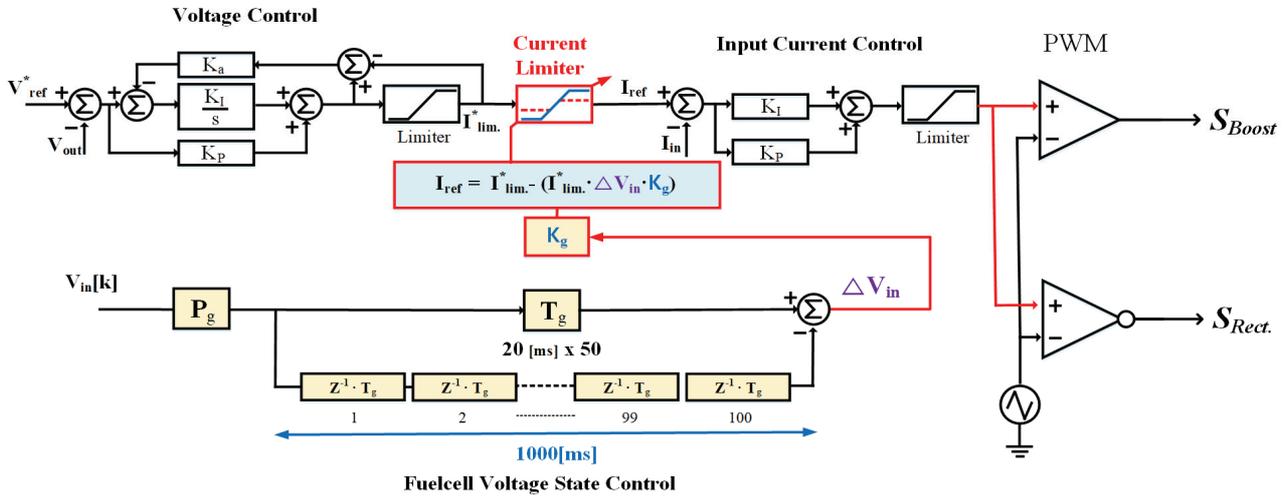


Fig. 10. Block diagram of fuel cell converter control.

돌입 전류에 의한 파손이 발생되어 부스트 컨버터 최종 출력단에 다이오드를 사용하여 역 전류를 막는 방법이 있으나, 다이오드에 의한 전위장벽과 내부저항에 의한 효율 감소로 고효율이 요구되는 연료전지 시스템에서는 사용할 수 없어 커패시터 용량은 배터리가 기능을 수행한다고 생각하고, 배터리와 커패시터의 전위차를 고려한 돌입전류량이 커패시터의 최대 전류량을 넘지 않는 범위 내의 용량으로 설계하면 된다. 제안하는 DC/DC 컨버터는 커패시터와 배터리의 전위차를 50[V]이고 C 값이 100[μF]일 때 최대 돌입전류가 250[A]여서 커패시터의 최대전류 300[A]를 초과하지 않는 용량으로 설계하였다.

3.4 연료전지 전압변동 보호 제어

그림 10은 연료전지용 DC/DC 컨버터의 제어 블록도를 나타낸다. 일반적으로 사용하는 PI 제어기를 사용하는 전류제어를 위하여 전압제어를 먼저 수행한다. 이때 연료전지용 DC/DC 컨버터는 출력전압제어를 수행하고 연료전지의 정전류 방전을 위하여 입력 전류제어로 제어한다. 수소 재순환 기능이 포함된 연료전지 스택의 전압은 수소의 순도에 따라서 정전류로 방전 시 전압의 변동이 생기게 된다. 전압변동이 생기는 조건은 연료전지의 화학반응 시 온도와 수소의 순도, 백금 촉매의 전류밀도에 따라서 변동되는데 온도와 전류밀도가 일정하다고 가정하고 수소의 순도에 따른 화학반응 시간을 고려하여 20[ms] 제어 루틴으로 50회 검출하여 전압강하가 지속적으로 발생되면 제어기의 전류 리미트의 값을 낮춰 출력전류를 줄이는 방법으로 제어된다. 출력전류가 낮아졌을 때 전압이 일정하게 유지되면 전류제어 리미트는 기존 세팅 값으로 변동되고 전압 강하율 센싱 루틴 카운트는 초기화된다. 전류 리미트에 의해서 전류 감소율은 200[A] 출력 시 190[A]로 5[%] 수치로 감소하게 되는데 5[%] 감소 시에도 전압강하가 발생되

면 다시 5[%] 감소하고 3번째 루틴에서는 Fault 처리하여 수소 재순환에 의한 수소농도 변화에 의한 감소가 아닌 이상 현상 발생으로 처리하여 고장 알람을 통합제어기에 전달하게 된다. 연료전지용 DC/DC 컨버터는 초기 On 시에 연료전지의 느린 화학반응에 의하여 충분한 Ramping 시간을 갖고 전력을 상승하여야 한다. 일반적으로 3초 이상의 상승 시간을 갖고 제어를 수행하는데 빠른 운전이 요구될 때는 선형적인 기울기의 상승이 아닌 초기에는 낮은 상승 시간 후 연료전지 스택의 용량의 30[%] 이상의 전력에 도달할 때 순간 100[%]의 전력을 방전하여도 된다. 일반적으로 시간에 전류 지령치를 나누어 제어 루틴에 따라서 지령치를 변동하나, 연료전지는 전류 지령치의 30[%]까지는 천천히 동작하고 30[%] 이상 시에는 전류 지령치의 상승을 최대치로 사용할 수 있다. 반대로 초기에 순간 전류를 방전하게 되면 분리막의 압력상승에 의해서 연료전지 수명이 급격히 저하되거나 파손이 발생할 수 있어 1초 이상의 램핑 시간이 요구된다.

3.5 효율 증대를 위한 스위칭 주파수 제어

연료전지 시스템은 전력변환장치의 효율에 따라 고가의 연료전지 용량이 선정되므로 시스템 단가와 크기를 줄이기 위하여 효율이 중요시된다. DC/DC 컨버터는 배터리의 SOC에 따라 최저 4[kW]에서 최대 7[kW] 출력으로 제어되는데 저부하에서 효율 감소가 되는 문제점과 전류리플에 의해 연료전지의 수명감소와 파손이 발생되어 최대 입력전류의 1.5[%] 이내의 리플 설계가 요구된다. 표 1은 전원장치의 스위칭 주파수에 따른 전력별 효율을 나타낸다. 스위칭 손실에 의해서 경부하일 경우, 스위칭 주파수가 낮을 때 효율이 증가되는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 표 2는 스위칭 주파수에 따른 전력별 입력전류리플을 나타낸다. 주파수가 높으면 중부하에서 효율이 감소하고 낮으면 최대부하에서 전류리플

TABLE I
EFFICIENCY BASED ON SWITCHING FREQUENCY

	4 kW	5 kW	6 kW	7 kW
20 [khz]	91.9 [%]	92.3 [%]	92.6 [%]	93 [%]
25 [khz]	91.4 [%]	92 [%]	92.5 [%]	92.8 [%]
30 [khz]	91 [%]	91.3 [%]	91.7 [%]	92.3 [%]
35 [khz]	90.1 [%]	90.6 [%]	91 [%]	91.5 [%]

TABLE II
INPUT CURRENT RIPPLE BASED ON SWITCHING FREQUENCY

	4 kW	5 kW	6 kW	7 kW
20 [khz]	3 [A _{pkpk}]	4 [A _{pkpk}]	6 [A _{pkpk}]	9 [A _{pkpk}]
25 [khz]	2 [A _{pkpk}]	3 [A _{pkpk}]	5 [A _{pkpk}]	7 [A _{pkpk}]
30 [khz]	1 [A _{pkpk}]	2 [A _{pkpk}]	3 [A _{pkpk}]	3 [A _{pkpk}]
35 [khz]	1 [A _{pkpk}]	1 [A _{pkpk}]	2 [A _{pkpk}]	2 [A _{pkpk}]

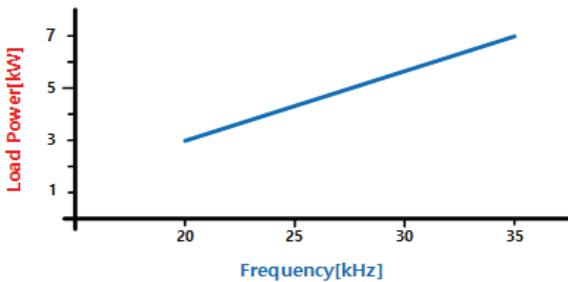


Fig. 11. Switching frequency by output power.

이 증가되는 문제점이 있어 전력에 따른 스위칭 주파수 제어기법의 적용이 요구된다. 스위칭 주파수는 전력에 따라서 20[kHz]에서 최대 35[kHz]로 가변하며 0.1[kHz] 단위로 가변하는 제어기법을 적용하였다. 그림 11은 전력에 따른 스위칭 주파수의 변동 그래프를 나타낸다. 4[kW]에서는 효율이 가장 높은 20[kHz]로 스위칭하고 전력이 증가할수록 스위칭 주파수를 높이는 방법으로 제어되어 전력에 따라서 효율을 최대치로 올릴 수 있으며 입력전류리플을 만족할 수 있다.

4. 실험

그림 12는 제안하는 컨버터의 효율측정을 위한 실험 환경 사진을 나타낸다. 입력은 연료전지를 연동하기 전에 DC Power supply를 이용하여 전원을 공급하였고 부하는 실제 사용된 리튬 폴리머 배터리팩을 이용하여 효율 측정 실험하였다. 전압은 DMM을 이용하여 측정하고 전류는 전류 클램프 미터를 사용하였다. 전력분석기와 오실로스코프는 전류 프로브의 스케일과 출력전압과 전류에 따른 리플에 따라서 오차가 발생되어 평균값 측정

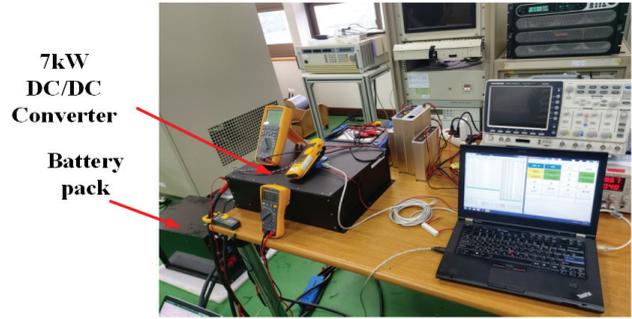


Fig. 12. Experiment of fuel cell DC/DC converter.



Fig. 13. Fuel cell system and forklift.

이 명확한 측정장비로 측정하였다. 효율측정 결과는 최대 출력 7[kW]에서 스위칭 주파수 30[kHz]일 때 92.3[%]로 최대 효율이 나오면서 입력전류 리플이 3[A_{pkpk}]로 연료 전지에서 요구하는 전류 리플 허용 범위를 만족하는 것을 실험을 통하여 검증하였다. 그림 13은 연료전지 시스템에 배터리와 컨버터를 장착하고 전동지게차의 기존의 납 배터리를 탈거하고 연료전지 시스템을 장착하여 실부하 실험을 진행하였다. 연료전지 스택에서 수소와 공기 중 산소가 반응하고 남은 수소는 1000[ms] 주기로 수소를 재순환하는데 재순환 시 5분에서 20분 사이에 1회 정도 전압이 흔들리는 현상이 발생되었다. 그림 14는 DC/DC 컨버터의 입력전압과 입력전류, 출력전압을 나타낸다. 수소가 재순환하여도 20분 이상 정상 동작하는 것을 확인할 수 있다. 그림 15는 수소 재순환 시 수소농도에 불순물 또는 수소농도가 낮을 때 DC/DC 컨버터의 입력전압과 전류 출력전압을 나타낸다. 수소 재순환 시 정전류 출력 시 전압이 강해지는 것을 확인할 수 있고 전류량을 감소시킨 뒤 다시 정상 지령치로 올려서 정상적인 출력을 발생하는 것을 실험을 통하여 제안하는 제어기법에 대하여 검증하였다. 수소공급은 연료전지 보호를 위하여 이론적 요구치보다 10[%] 이상을 더 공급하여 수소 재순환 시에 전압강하 발생률이 높지는 않지만 한 번의 전압강하로 연료전지가 파손될 수 있어 수소 재순환이 포함된 연료전지 시스템에서는 제안하는 제어방법이 요구된다.

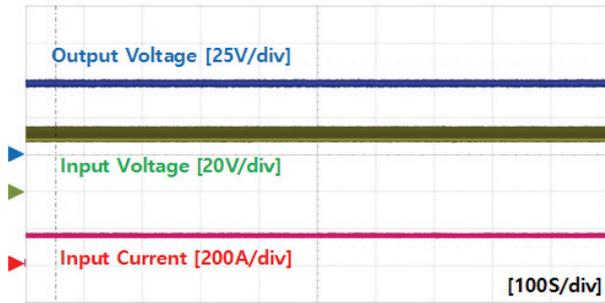


Fig. 14. Waveforms of input voltage, input current, output voltage at steady state.

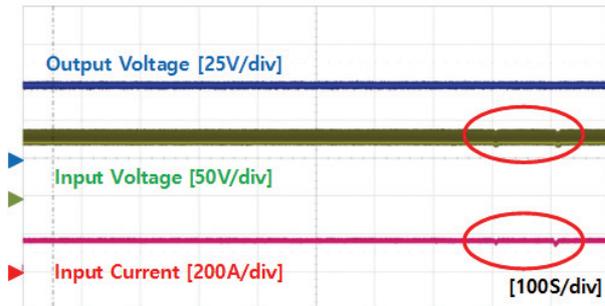


Fig. 15. Waveforms of input voltage, input current, output voltage at hydrogen recirculate.

5. 결 론

본 논문 연료전지 DC/DC 컨버터의 설계 및 효율 증대와 수소 재순환 시 발생하는 연료전지의 전압강하에 의한 과손을 방지할 수 있는 제어기법에 대하여 설명하였고 실험을 통하여 그 타당성을 증명하였다. 중부하에서 효율을 1[%] 이상 상승시켰으며, 연료전지 시스템을 지게차에 장착하여 수소 재순환 시 발생하는 문제를 제어하여 해결하였다. 제한하는 기법을 통하여 연료전지 시스템의 고효율화와 안정성을 증대시킬 수 있어 연료전지 시스템의 단가를 낮추고 신뢰성을 높일 수 있었다.

이 논문은 군산시의 지역맞춤형 전기차 클러스터 전문인력양성사업으로 지원된 연구임.

References

- [1] J. H. Choi and J. Y. Choi, "Research status of hydrogen fuel cell system based on hydrogen electric vehicle," *Journal of Energy Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 26 - 34, Dec. 2020.
- [2] J. H. Bae and S. R. Jung, "Analysis on impacts of renewable energy promotion on mitigation of air

pollution," *New&Renewable Energy*, Vol. 16, No. 3, pp. 13 - 26, Sep, 2020.

- [3] J. Lee, M. H. Shin, T. H. Eom, J. M. Kim, S. H. Kim, and C. Y. Won, "Current control technique for compensating voltage drop considering hydrogen recycle of fuel cell-battery hybrid system for forklift," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 31, No. 11, pp. 52 - 60, Nov. 2017.
- [4] J. S. Jo, S. M. Jung, J. H. Lee, S. W. Choi, and S. B. Han, "Control method of bidirectional DC-DC converter for fuel utilization and durability improvement in fuel cell vehicles," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 10, No. 5, pp. 428 - 435 Oct. 2005.
- [5] A. Shahin, M. Hinaje, J. P. Martin, S. Pierfederici, S. Raël, and B. Davat, "High voltage ratio DC-DC converter for fuel-cell applications," *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 57, No. 12, pp. 3944 - 3955, Dec. 2010.
- [6] S. Changchien, T. Liang, J. Chen, and L. Yang, "Novel high step-up DC-DC converter for fuel cell energy conversion system," *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 57, No. 6, pp. 2007 - 2017, Jun, 2010.
- [7] J. Lai and M. W. Ellis, "Fuel cell power systems and applications," in *Proceedings of the IEEE*, Vol. 105, No. 11, pp. 2166 - 2190, Nov. 2017.
- [8] Y. J. Song and P. N. Enjeti, "A high frequency link direct DC-AC converter for residential fuel cell power systems," in *IEEE Conf. PESC '04*, Vol. 6, pp. 4755 - 4761, 2004.
- [9] J. Y. Kim, S. H. Jung, S. P. Mun, J. Y. Ryu, and K. Y. Suh, "A study on power conversion system for fuel cell controlled by micro-processor," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 21, No. 5, Jun. 2007.



김가인(金可仁)

1997년 4월 3일생. 2021년 송원대 전기전자공학과 졸업. 2021년~현재 군산대 전자정보공학부 석사과정.



신민호(申旻浩)

1981년 7월 10일생. 2008년 한양사이버대 정보통신공학과 졸업. 2013년 성균관대 태양광시스템공학과 졸업(석사). 2017년 동대학원 태양광시스템공학과 졸업(공학). 2016년~현재 에이피이엘 대표이사.



이정효(李楨孝)

1982년 9월 20일생. 2006년 건국대 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2013년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(공학). 2007년 전자부품연구원 위촉연구원. 2009년~2010년 한국교통대 시간강사. 2016년~현재 군산대 전기공학과 부교수.