

# 소형 연료전지 연계형 DC GRID 부하 특성

이상우\*, 이상철\*\*, 권오성\*\*, 배준형\*\*\*, 박태준\*\*\*, 강진규\*, 이동하\*\*

\*대구경북과학기술원 차세대융복합연구센터(swlee77@dgist.ac.kr, apollon@dgist.ac.kr),  
\*\*대구경북과학기술원 로봇시스템연구부(sclee@dgist.ac.kr, ok235@dgist.ac.kr, dhlee@dgist.ac.kr),  
\*\*\*대구경북과학기술원 정보통신융합공학전공(baejunh@dgist.ac.kr, tipark@dgist.ac.kr)

## Load Characteristics of the DC GRID Connected to Small Fuel Cells

Lee, Sang-woo\* Lee, Sang-cheol\*\* Kwon, O-sung\*\* Bae, Jun-hyung\*\*\*  
Park, Tae-joon\*\*\* Kang, Jin-kyu\* Lee, Dong-ha\*\*

\*Advanced Convergence Research Center, DGIST(swlee77@dgist.ac.kr, apollon@dgist.ac.kr)  
\*\*Robotics System Division, DGIST(sclee@dgist.ac.kr, ok235@dgist.ac.kr, dhlee@dgist.ac.kr),  
\*\*\*Dept. of Information & Communication Engineering, DGIST(baejunh@dgist.ac.kr, tipark@dgist.ac.kr)

### Abstract

In recent years, understanding the dynamics of DC distribution system has become critically important due mainly to the increasing needs for the interconnection of DC distributed generators and the (DC-based) electric vehicle (EV) charging systems. In this paper, the characteristics of the DC grid system connected to the compact proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has been studied. In particular, the voltage and current transient phenomena were measured by varying the load of the DC grid system. Also, the voltage and current ripple were measured at the different load conditions. Our experimental results clearly manifested that the study contributes to the establishment of fundamental method to characterize the small DC grid system including distributed generation.

Keywords : DC 배전시스템(DC distribution system), 전압 민감도(Voltage sensitivity), 전기자동차(Electric vehicle), 전류 과도현상(Current transient phenomenon), 전압리플(Voltage ripple)

### 1. 서 론

직류 배전계통은 전력전자 기술의 발달과 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 수요증가로

인하여 직류 전력수요기술로 주목을 받고 있으며, 신재생에너지원의 접속이 증가하고 전기자동차 보급증대에 따른 부하가 증가할 것으로 예상되는 가운데 시스템의 효율증가를

위한 직류 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가되고 있다.[1]

직류 배전계통은 단순히 기존 전력계통에 연계하여 적용될 수 있는 새로운 기술에 접목하기 위한 것이 아니라 친환경 분산전원인 태양광이나 연료전지 융합기반 직류 배전계통으로의 급전에 대해 관심이 고조되고 있는 실정이다.[3][6]

해외의 경우, 미국과 일본을 중심으로 직류 배전을 이용한 직류 DC 효율 검증, DC 마이크로그리드, 주택 내 DC 배전 실증, DC 전원 공급을 위한 관련 연구 개발 및 실증 사업을 진행 중에 있고, 직류 배전 연구 개발에서 표준화는 중요한 이슈(issue)이며, IEC에서 직류 배전 시스템 중심의 표준화 단계를 추진하고 있다.[5]

직류 배전계통의 안정도에서 전압능력은 정상상태 혹은 외란이 발생한 후에 모션전압이 적정 전압을 유지할 수 있는지에 따라 결정된다. 직류 배전계통의 경우 부하가 증가하여 전압이 지속적으로 감소된다면 직류계통은 불안정상태에 도달하게 될 것이다. 이에 직류 배전계통에서 부하전류변화에 따른 적정전압, 전압 및 전류리플, 전압 및 전류 과도현상과 같은 전력품질과 관련된 규정의 정립이 필요하며, 직류 배전계통 구축 및 확산을 위해 전력품질 기준 마련이 필요하다.

실제 직류기 발전원 설계시 직류분권발전기는 교류성분의 리플을 감소시키기 위하여 정류자 수를 증가시켜 제작하고 있다.[4]

본 연구에서는 직류 배전계통의 신재생에너지원과 부하가 증가할 것으로 예상되므로, 직류 배전계통에 대한 전력품질의 기초적인 조사를 위해 소형 연료전지와 충전기 기반 직류 모의계통을 구성하고, 부하변화에 따른 전압특성을 실험하였다.

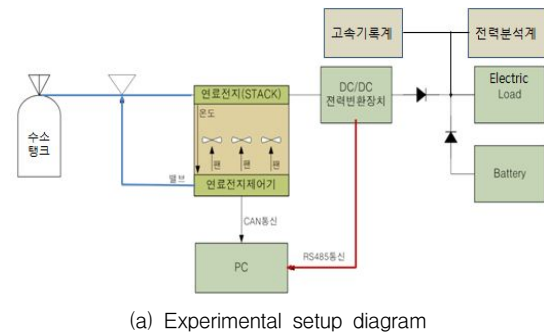
또한, 미래 에너지원과 신재생에너지원의 직류계통 연계가 증가될 것으로 예상되는 가운데 직류 배전계통의 기초적인 분석을 위하

여 소형 연료전지와 충전기 기반 직류 모의계통에서 부하전류변화에 따른 전압 및 전류의 리플(ripple)과 과도현상을 실험하였다.

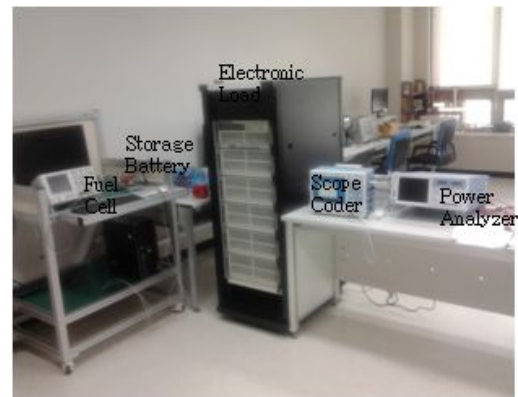
## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 연료전지에서 발생된 에너지를 DC-DC 컨버터로 변환하여 직류전자부하에 공급하고, 배터리에서 저장된 에너지와 연계하도록 구성하여 각각의 특성을 실험하였다. Fig 1(a)은 실험장치 구성도를 나타내었으며, Fig 1(b)은 실험장치 구성 사진을 나타내었다.

본 실험에서 발전원으로 사용한 연료전지는 정격용량 320[W], 정격전압 24[V], 정격전류 14.6[A], 효율 50[%] 이상인 연료전지를 사용하였다.



(a) Experimental setup diagram



(b) Experimental setup photo

Fig 1 Experimental setup diagram and photo

직류를 직류로 변환한 컨버터는 정격입력 전력 280[W], 정격입력전압 24[V], 정격입력 전류 11.6[A], 정격출력 250[W], 정격출력전압 23[V], 정격출력전류 10.9[A], 정격효율 90[%] 이상인 변환장치를 사용하였다.

에너지저장장치로 사용한 리튬폴리머 배터리는 용량 3,600[mAh], 정격전압 22.2[V], 방전전류최대 108[A]인 것을 사용하였다.

부하장치로 전자부하(PRODIGIT 33625F)를 사용하였으며, 전체용량은 10.8[kW], 리액턴스는 약 150[mH]인 것을 사용하였다.

부하 특성에 따른 과형을 관측하기 위하여 고속기록계(YOKOGAWA DL850)를 사용하였으며, 부하에 따른 전력 분석을 위해 전력 분석계(YOKOGAWA WT3000)를 사용하였다. 연료전지와 배터리 전원간의 부하전류공급방식은 정상상태의 경우, 부하전류가 대략 6[A]부터는 배터리가 부하전류를 담당하도록 구성하였으며, 과도시간의 경우 부하전류가 대략 6[A]까지는 부하증가에 따른 순간적인 부하전류변화는 배터리가 담당하도록 구성하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 전압-전류 및 전력-전류 특성

직류 배전계통은 교류 배전계통에 비해 단모션을 대상으로 하는 소규모 전력망으로 구성하는 경우가 많으며, 직류의 경우 외란이나 큰 부하가 운전되어 전압을 제어할 수 없으면 계통이 불안정하므로 컨버터에 의한 방법을 강구해야 한다.

직류 급전인 연료전지의 부하전류에 따른 전압변화 및 전력변화 특성을 고려한 연계가 이루어져야 한다.

소형 연료전지를 모의한 임의의 선로에 기본적인 전압안정도를 분석하기 위해 Fig2에 부하전류에 따른 전압특성곡선(V-I)을 나타내었으며, Fig3에 부하전류에 따른 전력특성

곡선(P-I)을 나타내었다.

Fig 2에서 부하전류 증가에 따라 부하전압은 점진적으로 감소하였으며, 부하전류가 대략 6[A]일 때, 연료전지에서 배터리 전원으로 전환 시에는 전압변화가 다른 부하영역에 비해 변화가 큰 것으로 나타났다.

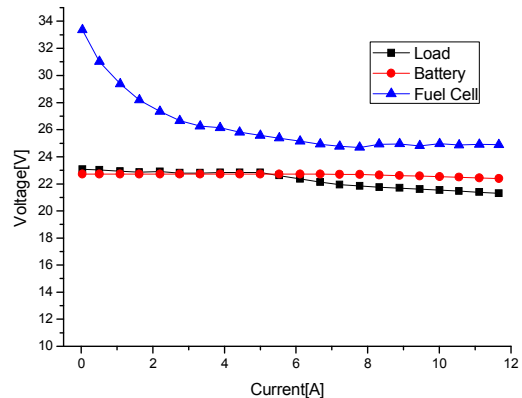


Fig 2 Current-voltage(V-I) curve with load current

Fig 3에서 부하전류 증가에 따라 부하전력은 부하전류가 대략 6[A]일 때, 연료전지에서 배터리 전원으로 전환되는 시점인 부하전압 변화에 따라 부하전력도 기울기가 둔화되는 시점으로 관측되었다. 이는 연료전지가 부담하던 부하가 일시에 배터리가 공급하여 줌으로 인하여 부하전압변화와 부하전력변화가 발생한 것으로 나타났다.

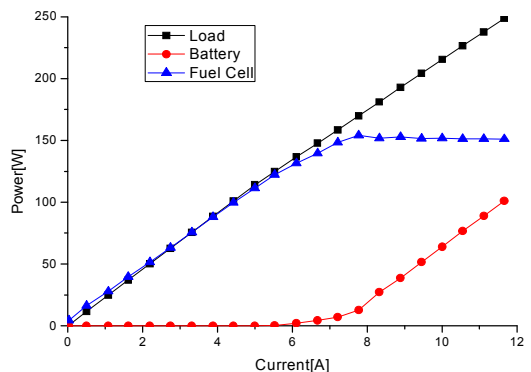


Fig 3 Power-current (P-I) curve with load current

대용량 연료전지와 저장장치가 직류 배전계통에 적용시 부하운전 상황에 따른 전압특성 및 전력특성이 고려되어야 직류계통간 연계시 연계장치의 개폐에 의한 Arc를 방지할 수 있다.

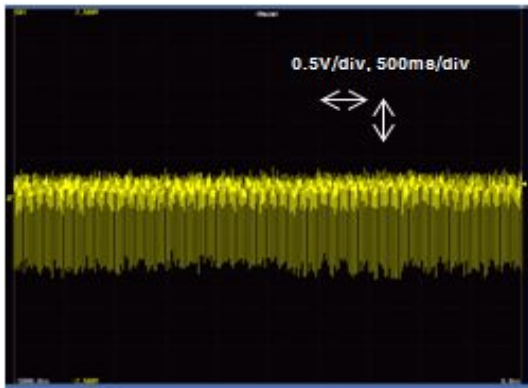
### 3.2 전압리플 및 전류리플 특성

직류성분에서 직류파형을 제거할 때 남는 파형을 교류성분 또는 리플(ripple)이라 하며, 전력전자 컨버터에서 출력전류는 출력전압보다 확실히 더 품질이 높다. 실제적으로 고품질의 직류 전류파형은 대략 5% 수준이하인 수% 정도의 리플율을 가진다.[2]

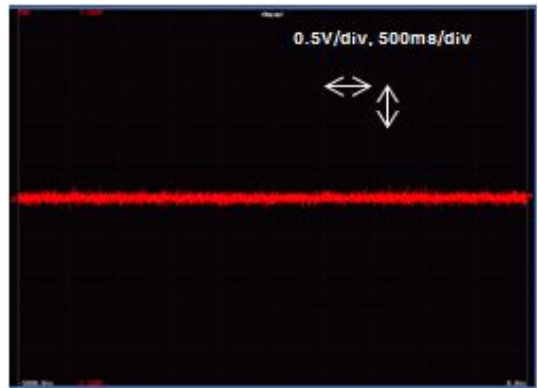
전류 리플율은 컨버터의 형태에 따라 다르며, 부하의 유도성분이 증가하면 감소한다.

Fig 4는 부하전류에 따른 전압리플을 나타내었으며, Fig 4(a)는 부하전류 4[A]일 때, Fig 4(b)는 부하전류 6[A]일 때 전압리플이다. Fig 4(a)는 연료전지에 의한 리플현상과 Fig 4(b)는 배터리에 의한 리플현상이며, 부하전류가 대략 5[A]이하일 때는 연료전지가 부하전류를 공급하고, 대략 6[A]이상에서는 배터리가 부하전류를 공급한다.

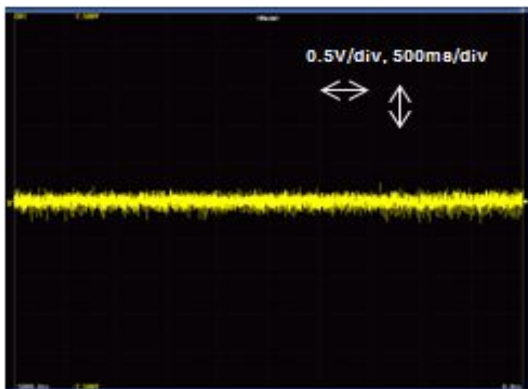
Fig 4에서 나타난 바와 같이 연료전지에 의한 리플은 배터리에 의한 리플보다 대략 4.1배 큰 것으로 나타났으며, 연료전지에 의한 부하사용시, 부하설비 스트레스로 인한 손실과 계통연계 동기에 대해 고려가 필요하다. Fig 5는 부하전류에 따른 전류리플을 나타내었다.



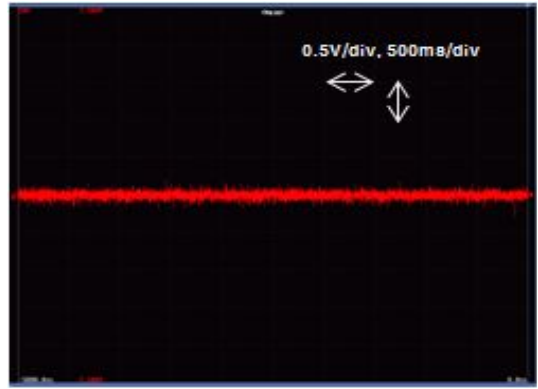
(a) Load current 4[A]



(a) Load current 4[A]



(b) Load current 6[A]



(b) Load current 6[A]

Fig 4 Voltage ripple with load current

Fig 5 Current ripple with load current

Fig 5(a)는 부하전류 4[A]일 때, Fig 5(b)는 부하전류 6[A]일 때 전류리플현상이다. 실험에서 나타난 바와 같이 전류리플현상은 연료전지나 배터리에서도 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 배터리에서 부하전류를 공급하는 부하전류가 대략 6[A]일 때, Fig 4(b)의 전압리플과 Fig 5(b)의 전류리플은 각각 변화가 적은 것으로 나타났다.

### 3.3 전압 과도현상 및 전류 과도현상 특성

하나의 정상상태에서 다른 정상상태로 천이되는 현상을 과도현상이라 하며, 신재생에너지의 직류 배전계통 연계시 고유진동이 없고 시정수를 줄이는 것이 계통안정도에 중요

하다. 전류과도현상은  $i(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ 에서  $t = 5\tau$ 일 때 정상상태에 이른다.

Fig6은 부하전류에 따른 전압 과도현상을 나타내었으며, Fig6(a)은 부하전류 4[A]일 때, Fig6(b)은 부하전류 10[A]일 때 각각 전압 과도현상이다. Fig6에서 나타난 바와 같이 전원s/w on과 동시에 R-L부하에 의한 시정수가 나타나고  $5\tau$ (정상상태)에 이르는 시간은 대략  $80[\mu s/div]$ 인 것으로 나타났다.

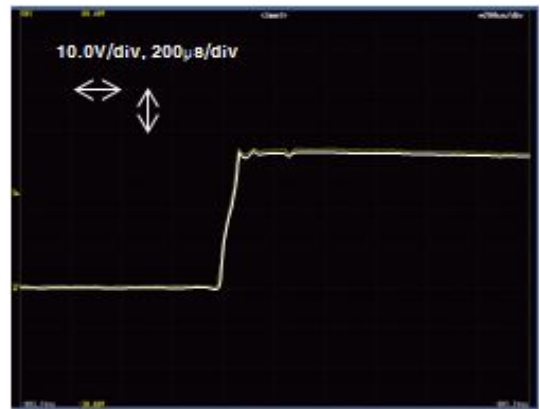
Fig6에서 전압의 고유진동은 부하전류에 관계없이 적은 것으로 관측되었다.

Fig7은 부하전류에 따른 전류 과도현상을 나타내었으며, Fig7(a)은 부하전류 2[A]일 때, Fig7(b)은 부하전류 4[A]일 때, Fig7(c)은 부하전류 6[A]일 때 각각 전류 과도현상을 나타내었다.

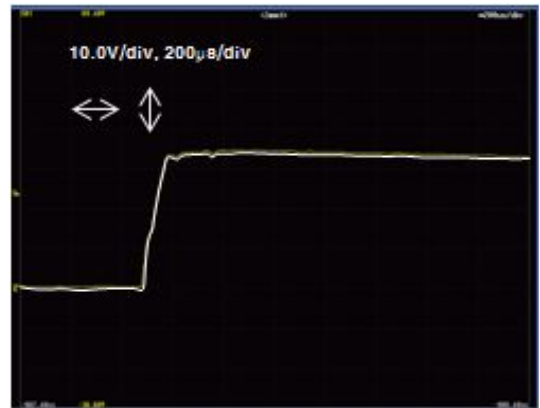
Fig7에서 부하전류가 증가함에 따라 Fig7(c)이 Fig7(b)에 비해 고유진동폭이 대략 3.0배 증가 되었으며, Fig7에서 나타난 바와 같이 정상상태에 이르는 시간은 같은 것으로 관측되었다.

부하전류가 2[A] 및 4[A]일 때, 연료전지에 의한 고유진동폭은 매우 적었으나, 부하전류가 6[A]이상인 배터리에 의한 고유진동폭은

부하전류 증가에 비례하여 증가되었다.

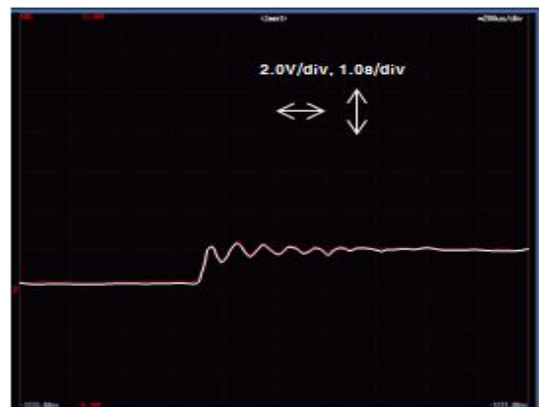


(a) Load current 4[A]

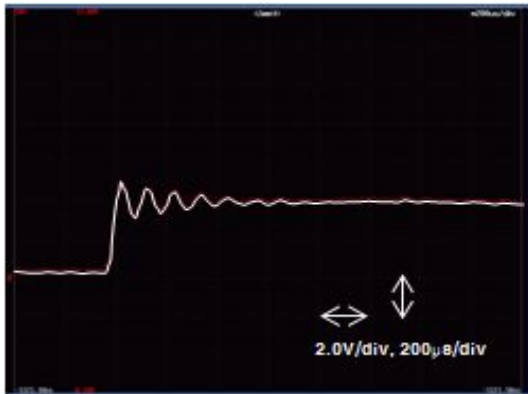


(b) Load current 10[A]

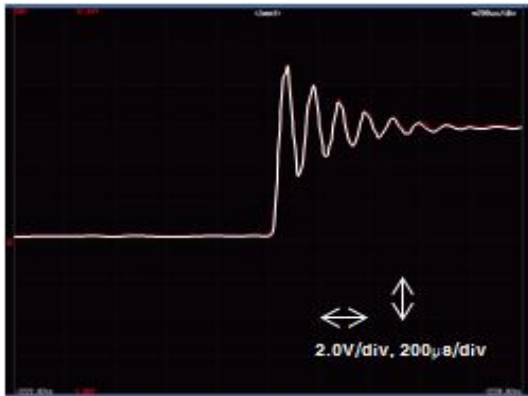
Fig 6. Voltage transient response with load current



(a) Load current 2[A]



(b) Load current 4[A]



(c) Load current 6[A]

Fig 7 Current transient response with load current

#### 4. 결 론

태양광이나 연료전지를 구성한 직류 배전 계통의 전력품질에 대한 기초적인 특성을 조사하기 위해 소형 연료전지와 배터리 기반 직류 모의계통을 구성하고, 부하전류에 따른 전압 및 전력 특성을 실험하였으며, 부하전류에 따른 전압 및 전류 리플과 과도현상을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부하전류에 따른 전압 특성은 연료전지에서 배터리로 전환되는 부하영역에서 다른 영역에 비해 변화가 큰 것으로 나타났으며, 부하전류에 따른 전력 특성도 연료전

지에서 배터리로 전환되는 부하영역에서 포화 특성이 나타났다.

- (2) 연료전지에 의한 전압리플은 배터리에 의한 전압리플보다 매우 크게 나타났으며, 동일조건에서도 전류리플은 전압리플에 비해 매우 적은 것으로 나타났다.
- (3) 부하전류에 따른 전압의 과도현상에서는 고유진동폭은 매우 적었으나, 전류의 과도현상에서는 고유진동폭이 부하증가에 비례하여 크게 증가되었다. 전압 및 전류의 정상상태에 이르는 시간은 각각 동일하였다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업에 의해 수행되었습니다.(12-BD-0102, 12-BD-0502)

#### References

1. Beom Jin Chung, Hyung-Soo Mok, Jae-Hoon Joo, and Sung-Yong Son, An operating efficiency analysis for an in-house DC power system with distributed energy resources, KIEE summer conference, 2010.7.14-16, pp. 430~432
2. Andrzej M and Trzynadlowski, Modern power electronics, Han\_Bit Media, 2011.
3. H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, R. Uchida, DC Voltage Control of the DC Micro-grid for Super High Quality Distribution, 2007, Nagoya, Japan, April 2-5, 2007.
4. Bok-Soo Jung, Electric machinery design, Hyung-Sul, 1991.
5. Monthly Electricity, Jan./2012.
6. Cheol-Hee Yu, Il-Yop Chung, Sung-Soo Hong, Wookyu Chae, Juyong Kim, A Feasibility Study on DC Microgrids Considering Energy Efficiency, Transactions of KIEE, Vol. 60, No. 9, pp. 1674-1683, 2011