

계통연계형 가정용 연료전지 시스템의 전력제어에 관한 연구

이정민, 정홍주, 정준모, 서인영, 한세희
(주)효성 중공업연구소

A Study on the Power Control of Grid-Tied RPG Fuel Cell System

J.M. Lee, J.H. Jung, J.M. Chung, I.Y. Suh, S.H. Han
Power & Industrial System R&D Center, Hyosung Corp.

ABSTRACT

연료전지를 이용한 가정용 분산전원시스템은 열과 전기를 동시에 얻을 수 있는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 PEMFC형 연료전지의 V-I 특성과 이에 따른 계통연계형 가정용 연료전지 시스템의 전력제어 시 고려해야 할 사항을 기술하고 제안된 제어방식에 대해 수행된 시뮬레이션 및 시험결과를 제시하고자 한다.

1. 서론

신재생에너지를 이용한 분산전원시스템에 대한 연구 및 실증이 활발히 이루어지고 있으며, 특히 수소에너지를 이용하는 연료전지 발전 시스템은 바람, 태양, 조류 등과 같이 상시 운영을 하지 못하는 단점을 극복하고 전기에너지와 동시에 부수적으로 발생하는 열을 이용하여 전체 발전시스템의 효율을 상당히 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 대부분의 가정용 전기 부하는 계통을 통한 단상전력을 공급받고 있으므로, 가정용 연료전지 시스템은 단상인버터를 통한 계통연계운전 제어방식에 대한 연구가 주로 이루어 졌다.^[1]

가정용 연료전지 시스템은 가정에 공급되는 도시가스를 개질시켜 생성된 수소와 공기 중의 산소를 이용하고 1kW급 수냉식 고분자전해질형 연료전지(PEMFC)에 의해서 열과 전기에너지를 동시에 만들어 낸다. 상시 연속운전을 하지 않고 1일운전/정지(Daily Start Stop)의 특징을 갖는다. 또한 운전 중에 온수저장고의 물이 계속 생성되므로 Electrical Demand보다는 Heat Demand에 의해 운전하는 것이 효율적이며 계통연계운전을 통하여 Electrical Demand 부분은 충족가능하다.^[2]

연료전지는 저전압, 대전류의 특성을 갖는 직류원이며, 계통전원에 연계하기 위해서는 전력변환기(Power Conditioning System)가 필요하며 절연형 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터로 구성된다. 기존의 출력전력제어방식은 연료전지의 초기상태(Beginning of Life)에서의 정격전력을 고려하여 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터를 정전력 제어하도록 구성하였다. 일반적으로 연료전지는 사용경과(수명) 또는 BOP(Balance of Plant)의 운전조건에 따라 V-I 특성곡선이 달라지며, 초기상태(Beginning Of Life)에 비해 출력전력이 감소하는 경향이 있다. 본 논문에서는 이러한 연료전지의 V-I 특성을 고려하여 전력제어방식을 제안하고 개발된 전력변환기에 적용하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 전력제어방식을 확인 하였다.

2. PEMFC의 V-I 특성

PEMFC의 반응온도는 25~80°C로 저온형 연료전지에 속하며, 그림1과 같이 단위셀의 이론적인 개방전압은 1.2V이다. 연료전지의 출력전류에 따른 전압특성은 크게 Activation Loss영역, Ohmic Resistance영역, Mass Transport Limitation영역으로 구분된다. Mass Transport 영역이하에서 연료전지운전은 성능저하를 일으키는 직접적인 원인이 되므로 시스템 제어변수로 사용된다. 연료전지 제조사에 따라 다르지만 단위셀당 0.65[V]이하로 떨어지지 않도록 BOP(Balance of Plant)를 제어한다. 이론적 개방전압 E_{OC} 에 대한 각각의 전압손실을 수식(1)로 나타낼 수 있다.

$$V = E_{OC} - A \ln(i) - ir + m \exp(ni) \quad (1)$$

여기에서 A는 Activation loss의 기울기, r은 단위면적당 저항, m & n은 Mass transport 상수임.

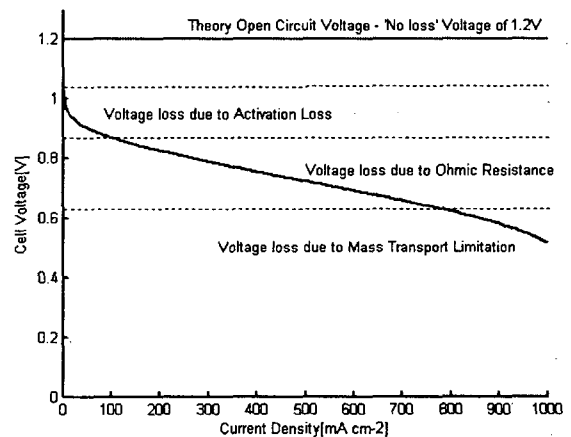


그림 1 고분자전해질형 연료전지의 V-I 특성곡선(1)
Fig. 1 A V-I Characteristic Curve of PEMFC(1)

연료전지의 초기상태(Beginning Of Life)에서 정격출력전력은 그림2와 같이 실선의 전압과 전류 곱(면적)으로 나타낼 수 있으며, 연료전지를 사용함에 따라 V-I 특성곡선은 전류에 따른 전압강하분이 상승하는 점선의 형태로 변한다. 이때 동일한 전력을 출력하기위한 전압, 전류 곱은 점선으로 나타낼 수

으며 전압크기가 연료전지의 제한범위를 벗어나게 되고, 시스템의 이상감지에 의한 비정상적인 BOP정지로 연료전지의 성능저하를 더욱 빠르게 가져오게 된다. 그러므로 전력변환기에서 연료전지로부터 정전력제어에 의한 전기에너지를 출력할 경우 이러한 문제를 일으킬 수 있다.

본 논문에서 제안하는 전력제어방식은 연료전지의 초기상태(Beginning of Life)에서 제시된 기준전류값에 의한 정전류제어와 Mass transport 전압제한값 이하로 벗어나지 않도록 하는 정전압제어를 병행하는 방식이다. 이때 연료전지의 사용경과에 따른 출력전력 감소량은 계통전원에서 보상가능하므로 전력변환기는 연료전지에서 출력되는 전력만을 부하에 공급하게 된다.

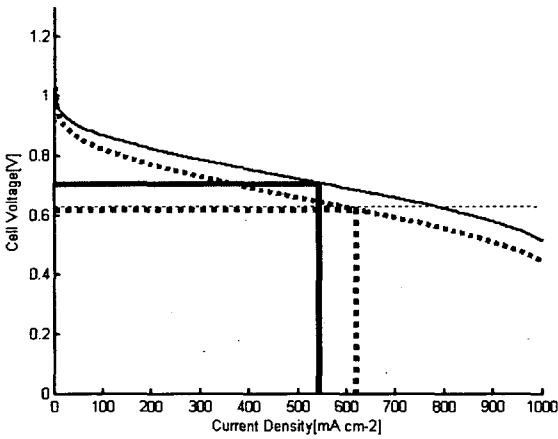


그림 2 고분자전해질형 연료전지의 V-I 특성곡선(11)
Fig. 2 A V-I Characteristic Curve of PEMFC(11)

3. 전력변환기 구성

전력변환기는 그림3과 같이 절연형 Push-pull DC/DC 컨버터와 정류부, 단상 DC/AC 인버터로 구성된다. 하드웨어 및 전력토폴로지는 기존에 개발 되어진 계통연계형 가정용 연료전지 시스템을 위한 1kW급 전력변환기이며, 제안하는 전력제어방식을 적용하기 위하여 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터의 제어를 독립적으로 분리하였다.

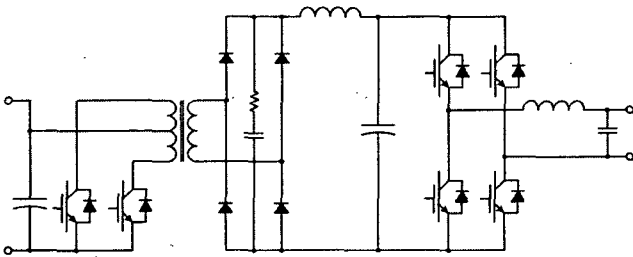


그림 3 전력변환장치의 전력회로도
Fig. 3 A Power Circuit Diagram of PCS

인버터는 순시전력제어, 유효전력 및 무효전력의 독립적인 제어를 위하여 D-Q 변환을 이용한다. 계통전압으로부터 동상의 D축 교류분($I_{s,ds}$, $V_{s,ds}$)을 얻으며 APF(All Pass Filter)에 의한 크기변화 없이 90°위상차이를 갖는 Q축 교류분($I_{s,qs}$, $V_{s,qs}$)을 얻는다. 무효전력성분인 Q축 직류분 기준전류 $I_{s,qs}^*$ 는 '0'으로 설정하고, 유효전력성분인 D축

직류분 기준전류 $I_{s,de}^*$ 는 다음과 같이 DC-Link 전압제어를 통하여 얻는다.

$$I_{de}^* = K_p (V_{DC}^* - V_{DC}) + K_i \int (V_{DC}^* - V_{DC}) dt \quad (2)$$

DC-Link 전압제어는 연료전지에 의한 DC/DC컨버터 동작으로 DC-Link 커패시터를 충전시킴으로써 수행된다. DC/DC컨버터로부터 공급되는 전력에 의해 기준전압과 실제전압차이가 발생하므로 인버터에서 계통으로 출력하는 유효전력은 DC/DC컨버터에서 출력되는 전력으로 제한된다.

컨버터는 연료전지의 초기상태(Beginning of Life)에서 정격전류를 제어기준 값으로 설정하고, 연료전지의 경고전압이하 운전이 되지 않도록 전압기준 값을 설정하면, 다음 식과 같이 에러신호를 정규화 가능하다.

$$I_{Err_Normal} = \frac{I_{FC}^* - I_{FC}}{I_{FC}^*} \quad (3)$$

$$V_{Err_Normal} = \frac{V_{FC} - V_{FC}^*}{V_{FC}^*} \quad (4)$$

정규화된 에러신호 중 최소값을 PI제어기를 통하여 DC/DC 컨버터의 PWM에 적용시키면, 기준전압이나 기준전류 중에서 제한값에 근접한 항목으로 제어된다.

언급한 바와 같이 인버터와 컨버터의 제어구성을 다음 그림4와 같이 나타낼 수 있다.

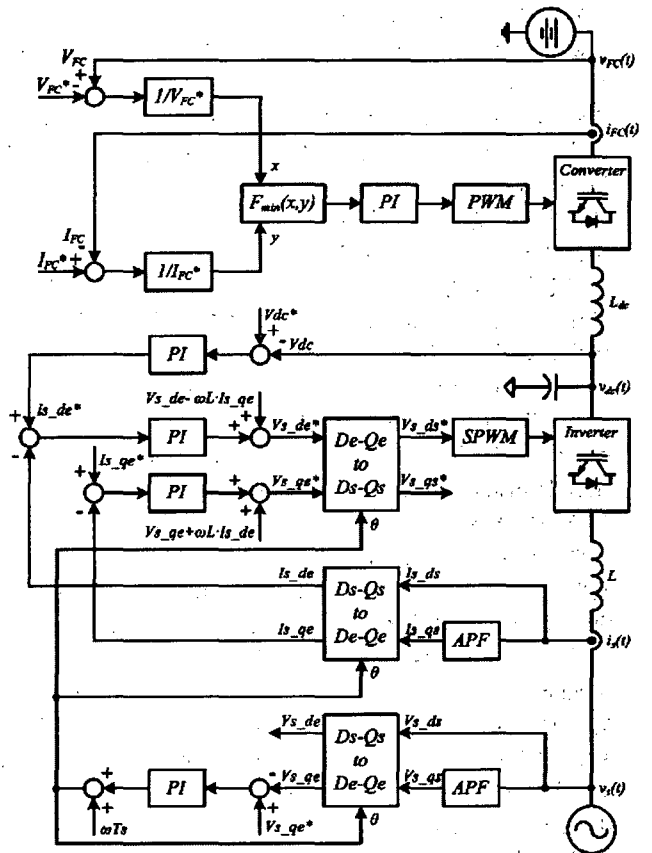


그림 4 컨버터 및 인버터 제어구성도
Fig. 4 A Control Block Diagram of Converter and Inverter

4. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 전력제어알고리즘을 그림5와 같이 Psim으로 구현하여 전체적인 제어관련 성능을 검증하였다. 그림6은 계통전압과 전류파형을 나타내며, 유효전력성분인 D축 직류분 기준전류 $I_{s,dc}^*$ 에는 DC-link전압에 포함된 120Hz 성분이 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

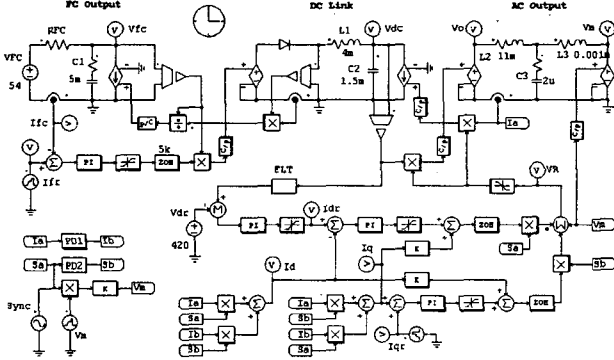


그림 5 시뮬레이션 회로
Fig. 5 Simulation Circuit

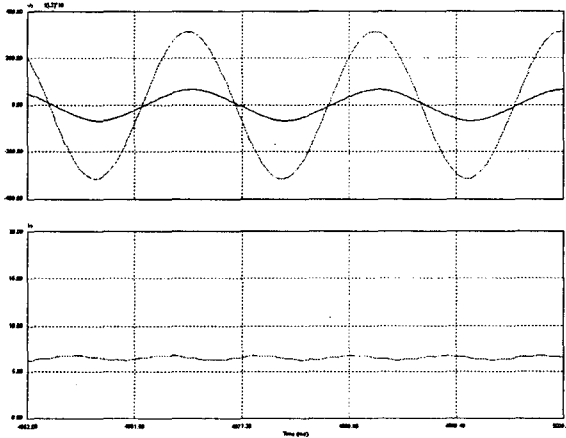


그림 6 시뮬레이션결과 : 인버터출력전류 및 계통전압, $I_{s,dc}^*$
Fig. 6 Simulation Results : Inverter Output Current, Grid Voltage, $I_{s,dc}^*$

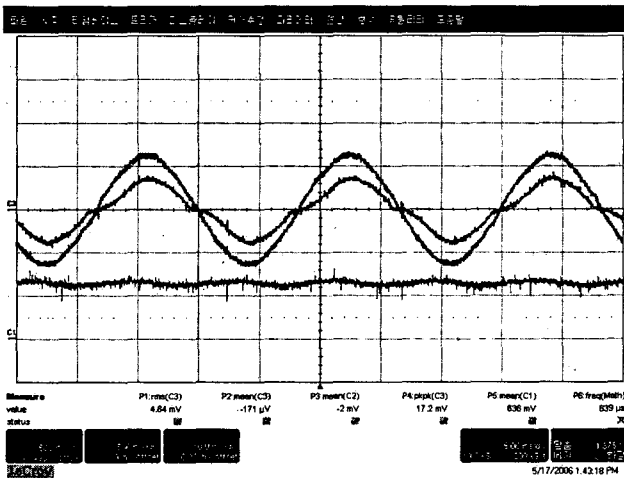


그림 7 실험결과 : 인버터출력전류[10A/div] 및 계통전압[250V/div], $I_{s,dc}^*$ [5A/div]
Fig. 7 Experimental Results : Inverter Output Current [10A/div], Grid Voltage[250V/div], $I_{s,dc}^*$ [5A/div]

실험구성에 있어서 연료전지 대신 모의용 직류전원장치를 사용하였고, 기 개발된 전력변환장치를 사용하였다. 그림7의 실험결과는 시뮬레이션과 동일한 결과를 얻을 수 있었으며 1kW 정격에서 계통전압과 전류, 유효전력성분인 D축 직류분 기준전류 $I_{s,dc}^*$ 에 대한 파형을 얻었다.

5. 결론

본 논문에서는 PEMFC형 연료전지의 V-I 특성에 대해 언급하였고, 기존에 사용해 오던 전력제어방식과 차별화된 연료전지의 특성을 고려한 방식을 제안하였다. 제안된 제어방식에 대해 시뮬레이션 및 시험결과를 통하여 제어 성능을 확인하였다. 향후 연료전지 시스템과 연계를 통하여 전력제어에 대한 검증을 할 계획이다.

이 논문은 산업자원부 대체에너지실용화평가사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Rae-Young Kim, See-Young Choi, In-Young Suh, "Instantaneous control of average power for grid tie inverter using single phase D-Q rotating frame with all pass filter", *IEEE IECON04*, Vol. 1., pp. 274-279, 2004, Nov.
- [2] K. Nishizaki, M. Kawamura, N. Osaka, K. Ito, N. Fujiwara, Y. Nishizaka, H. Kitazawa, "Development of a Residential PEFC Co-Generation System", *2005 Fuel Cell Seminar*, Vol. 1., pp. 299-302, 2005, Nov.
- [3] Gopinath, R, Sangsun Kim, Jae-Hong Hahn, Enjeti, P.N., Yeary, M.B., Howze, J.W., "Development of a low cost fuel cell inverter system with DSP control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19., pp. 1256-1262, 2004, Sept.
- [4] T.A. Nergaard, J. Ferrell, L. Leslie, J. Lai, "Design Consideration for a 48V Fuel Cell to Spilt Single Phase Inverter System with Ultracapacitor Energy Storage", *IEEE PESC02*, Vol. 4., pp. 2007-2012, 2002, June.
- [5] N.G. Hingorani, "A Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply", *IEEE APEC02*, Vol. 1, pp. 605-613, 2002, March.
- [6] J. Wang, F. Z. Peng, J. Anderson, A. Joseph, R. Buffenbarger, "Low Cost Fuel Cell Converter System for Residential Power Generation", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1315-1322, 2004, Sep.