

연료전지 전력변환 및 시스템 제어를 위한 연료전지 모의실험 장치의 개발

정 학근, 한 수빈, 정 봉만, 박 석인, 김 규덕, 유 승원  
한국에너지기술연구소 전기에너지연구팀

Development of the Fuel Cell Simulator for the Fuel Cell Power System Control

Jeong Hak-Geun, Han Su-Bin, Jung Bong-Man, Kim Kyu-Deok, Park Suk-In, Yu Seung-Weon  
Electric Energy Research Team, Korea Institute of Energy Research

**Abstract** - 고효율, 무공해의 신발전 기술인 연료전지 발전은 발전 용량 및 스택구성에 따라 차이가 있으나 기본적으로 저전압, 대전류 특성과 부하에 따라 발전 전압이 크게 변동하는 특성을 갖는 직류전원으로써 이를 상용으로 이용하기 위해서는 연료전지 발전 전력을 안정된 전력으로 변환하여 주는 장치가 필요하며, 이러한 전력 변환장치가 연료전지 발전의 최종 출력 전원의 질을 결정한다. 연료전지 전력변환장치는 전압조절기능, 승압기능을 가져야 하고, 연료전지 본체와 부하를 안정하게 운전하기 위해 전력변환장치 뿐만 아니라 부하와 연료전지 본체의 운전상태 감지 기능, 각종 장치의 보호와 제어기능을 가져야 한다.

본 논문의 목적은 자동차용 연료전지 출력 전력변환장치의 종합제어장치의 설계를 위해 연료전지 스택시뮬레이터를 개발하는 것이다. 연료전지 스택 시뮬레이터는 연료전지 발전 특성과 일치하는 전력을 출력해 주는 직류전원 공급장치로써 이를 이용하여 연료전지 출력 전력 변환장치의 종합제어장치를 충분한 예비실험과 수정, 보완함으로써 연료전지용 전력변환 시스템의 성능개선, 안정성 향상 등을 가질 수 있다.

1. 서 론

에너지 절약과 환경 공해문제 그리고 최근에 부각되고 있는 지구 온난화 문제 등을 해결하기 위해 고효율, 저공해 발전시스템인 연료전지가 기존의 내연기관을 대체하기 위한 자동차 동력기관으로 주목을 받고 있다. 연료전지는 연소과정 없이 화학에너지를 전기 화학적으로 직접 전기로 변환시키는 시스템으로 효율이 높고 공해 물질의 배출이 거의 없기 때문에 전기자동차에 탑재시킬 수 있는 전력 공급원으로서 매우 이상적인 발전장치이다.

택을 중심으로 스택의 보호장치, 연료/공기의 공급계통과 스택의 전기적 출력을 일정전압으로 출력하도록 하여 축전지에 연계시키는 DC/DC 컨버터 그리고 이들을 제어하는 제어기인 마이크로 콘트롤러로 구성된다.

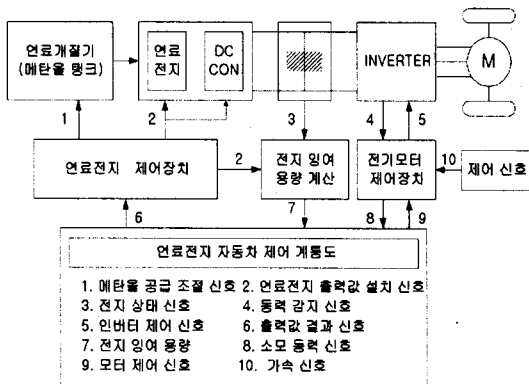
이 연료전지 엔진부는 연료전지 자동차의 핵심 기술이며 축전지와 연계 운전방식을 통해서 부하의 증가/감소에 따른 변화에 대해 쉽게 동력을 공급하도록 하여야 하며 동시에 에너지의 이용 효율을 극대화시킬 수 있어야 한다. 이를 위해서는 전지스택에 대한 제어시스템의 효율적인 설계 및 적절한 운전방식의 구현이 필요하다. 그러나 이러한 요구를 달성하기에는 연료전지 시스템의 경우 복잡적이고도 처리하기가 어려운 문제가 많이 발생하므로 고도의 다양한 기술이 필요하게 된다. 우선 전기적인 측면에서 보면 연료전지는 그 전기출력이 부하뿐만 아니라 연료/공기의 공급상태에 의해 매우 심하게 변동하게 되는 문제를 갖고 있다. 따라서 일정전압을 필요로 하는 축전지 및 인버터시스템에 연계하기 위해 연료전지의 전기에너지를 제어할 수 있는 방안이 있어야 한다. 또한 부하의 변화에 대해 연료공급기의 경우 응답속도가 느리므로 부하추종을 위한 제어기 용이하지 않으며 실제로 스택시스템의 온도, 압력, 유량 등 여러 인자에 의해 제어적 특성이 변동되는 복잡성을 해결하여야 한다.

따라서 본 논문은 복잡한 연료전지 출력 전력변환장치의 종합제어장치의 설계를 위해 연료전지 발전 특성과 일치하는 전력을 출력해 주는 연료전지 시뮬레이터를 개발하여 연료전지 출력 전력변환장치의 종합제어장치를 충분한 예비실험과 수정, 보완함으로써 연료전지용 전력변환 시스템의 성능개선, 안정성 향상 등을 도모하도록 한다.

2. 연료전지 및 전력변환 특성

연료전지스택은 [그림 1]과 같은 구조의 단위전지를 기본 구성단위로 하여 직·병렬 연결에 의해서 구성되며 단위전지에서는 외부에서 공급된 공기 및 수소와 두 전극사이의 전해질과의 전기적 화학반응에 의한 이온화 과정이 발생되어 두 전극사이에는 이론적으로는 1.2V의 전위차가 생기게 되고 부하가 두 전극사이에 걸리면 전류의 경로가 형성되어 에너지는 전지에서 부하로 공급되게 된다. 이때 전지는 내부저항에 의한 영향에 의해서 부하가 클수록 출력전압은 떨어지며 정격전류(전지에 손상을 주지 않고 흐를 수 있는 최대전류로 정의)시는 약 전지전압이 0.5V-0.6V가 되게 한다. 따라서 부하에 따른 전압 변동율이 매우 큰 특성을 갖게 된다. 또한 전지의 전류밀도는 통상 150~300mA/cm<sup>2</sup>으로서 단위면적이 100cm<sup>2</sup> 이상인 경우 100A이상인 전류가 흐르므로 저전압 대전류 특성의 전압원으로 전지를 모델링할 수 있다.

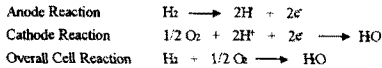
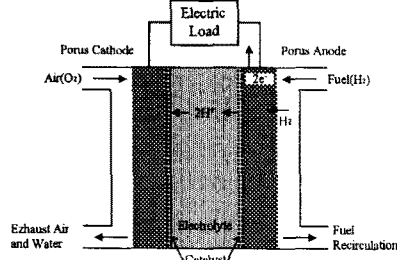
단위전지의 전기적 특성은 큰 전압 변동율을 갖는 저전압 대전류 특성의 전압원으로 전지스택도 같은 특성을 갖게되고 특히 소출력일수록 그 경향은 뚜렷해진다.



[그림 1] 연료전지 자동차의 시스템 개요

연료전지 자동차의 제어측면에서의 시스템 개요는 [그림 1]과 같다. 여기에서 연료전지 엔진부는 연료전지 스택

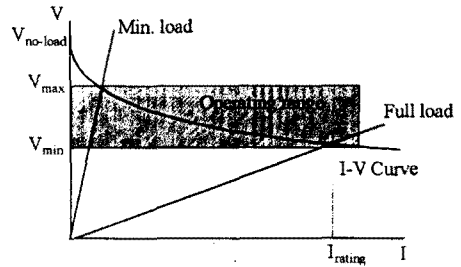
이 두 가지 특성이 연료전지용 전력변환에 가장 큰 영향을 주는 요소이며 실제적인 운전에서 주변시스템과 관련하여 나타나는 특징을 포함하여 전력변환에 영향을 주는 요인을 살펴보면 <표 1>과 같다.



[그림 2] 연료전지 구조와 발전원리

[표 1] 연료전지 특성

연료전지특성	전력변환 특성
전압변동특성	연료전지의 실제 발전시 안정되게 동작시키기 위해서는 무부하 운전을 하지 않는다. 항상 최소 정격의 1/4부하에서부터 정격사이의 영역 안에서 동작시켜야 전지의 수명이 가장 길어지기 때문이다. 따라서 스택전압의 전압 변동을 30% 정도가 된다. 따라서 이 전압변동에 출력전압이 일정전압을 유지하도록 하는 전압조절기능이 필요하다.
저전압·대전류 특성	소출력 연료전지의 경우는 스택전압이 매우 낮게 되므로 승압이 필요하게 되며 그 승압비가 클수록 효율이 떨어지고 장치의 부피가 커지게 된다. 또한 스택은 단위전지를 일반적으로 직렬로 적층하여 제작되므로 스택의 정격대전류는 수 kW용량이 스택을 전력 변환할 때 수십 kW의 전력변환장치에서 사용되는 전력소자용량이 필요하게 되어 소자활용면에서 비효율적이 된다.
I-V특성	연료전지의 I-V 특성은 (그림 3)과 같이 전류가 증가함에 따라 전압이 감소하며 공급되는 연료 및 공기의 이용률과 동작온도에 따라 I-V특성이 변화하게 된다. 실용적인 발전시스템으로서 동작되기 위해서는 스택의 I-V 특성을 일정하게 유지시켜 주는 것이 필요하며 따라서 상용시스템에서는 온도 이용률과 공기 이용률을 고정시켜서 운전하며 스택의 동작 온도도 일정하게 유지되도록 제어한다. 비록 온도, 공기 및 연료 이용률이 일정하게 유지되더라도 부하에 따라 스택에 공급되는 공기 및 연료의 유량이 조절되지 않으면 실제 동작점은 I-V 특성곡선을 이탈하게 된다.
응답속도	공기 및 연료유량제어 응답속도는 전지내의 전기화학반응보다 매우 느리게 되므로 스택이 부하변화에 반응하는 응답속도는 결국 공기 및 연료의 유량제어 특성에 지배되며 특히 사용하는 연료로부터 수소성분을 얻어내는 개질기의 응답특성이 시스템의 전체 응답특성을 지배하게 된다.

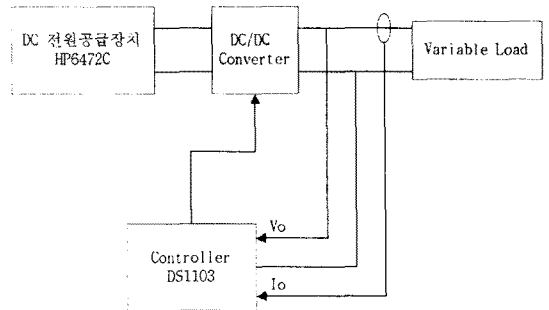


[그림 3] 연료전지 I-V 특성 및 동작 영역

### 3. 연료전지 시뮬레이터

연료전지 스택시뮬레이터는 연료전지 발전특성과 일치하는 전력을 출력해 주는 직류전원 공급장치로써, 이를 이용하여 충분한 예비실험과 수정, 보완함으로써 연료전지용 전력변환 시스템의 성능개선, 안정성향상 및 스택과 병행개발에 의한 개발기간 단축이 주된 목적이다. 시뮬레이션 대상은 최종 출력이 5kW급 자동차용 연료전지이며, [그림 3]과 같은 I-V 특성곡선을 갖도록 하는 것이다.

[그림 4]는 스택 시뮬레이터의 구성도와 연료전지스택 시뮬레이터 장치이며, 직류전원공급장치, 제어장치, 부하장치와 운전상태를 계측하고 제어하는 신호감지 센서, AD 변환기, DA 변환기 등으로 구성하였다.



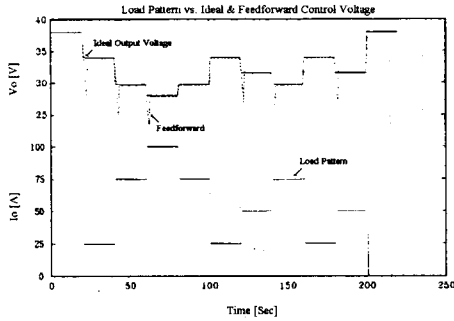
[그림 4] 스택 시뮬레이터 구성도

그림에서 직류전원 공급장치는 HP6472 DC Power Supply를, 부하전류감지는 Hall 센서와 A/D 변환기, 제어장치는 DSPACE1103으로 구성하였다. 먼저 [그림 4]와 같은 I-V 특성곡선 데이터를 Table로 적성(LUT, Look Up Table)하여 메모리에 저장한 다음, 1) 부하전류(Io)와 전압(Vo)을 읽고, 2) LUT와 Io에 의해 목표출력전압(Vt)을 근사화하고, 3) 에러량(Er=Vt-Vo)과 누계(Es) 또는 에러변화량(dE)를 계산하여, 4) PI 제어기법 또는 Fuzzy 제어기법에 의해 조작전압(Vu)를 계산하고, 5) DA 변환기를 통해 출력한다.

#### 가. Feedforward 제어

[그림 5]는 부하전류를 0[A], 25[A], 75[A], 100[A], 75[A], 25[A], 50[A], 75[A], 25[A], 50[A], 0[A]로 변화할 때 이상적인 출력파형과 Feedforward 제어 응답 파형이다.

그림에서 보듯 HP6472C 장치의 특성상 전압 상승시에는 매우 빠르고 안정된 응답특성을 가지며, 전압 하강시에는 느리고 심한 Overshoot가 발생된다. 따라서 적절한 제어로 과도현상의 개선이 요구된다.



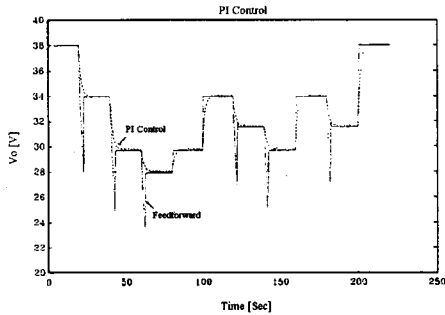
[그림 5] Power Supply의 Feed Forward 응답

나. PI 제어기 설계 및 실험

PI 제어기에 사용된 제어상수 값은 제어주기  $T = 0.1$ 초, 비례상수  $k_p = 0.1$ , 적분상수  $k_i = 0.2$ 와 같으며, 제어순서는 다음과 같다.

- (1) Read Load Current( $I_o$ ) using Hall Effect Device and ADC
- (2) Calculate Target Voltage( $V_t$ ) and Read Output Voltage( $V_o$ )
- (3) Error( $E_r = V_t - V_o$ ), Error Sum( $E_s = E_s - E_r$ )
- (4) Calculate Drive Voltage( $V_u = k_p \times E_r + k_i \times E_s$ )
- (5) Drive  $V_u$  to DC Power Supply using DAC

[그림 6]은 Feed forward 제어응답과 PI 제어응답 특성을 비교한 것이다.



[그림 6] Feed Forward 응답과 PI 제어 출력 비교

다. Fuzzy 제어기 설계 및 실험

퍼지제어기는 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB의 7개의 퍼지 집합과 에러량( $E_r$ ), 에러량 변화율( $dE$ )에 대한 조작량 변화율( $dU$ )에 대한 49개의 퍼지 규칙(표 2)을 사용하였으며, 추론방법으로는 무게 중심법(Center of Gravity, COG)으로 Defuzzify하였다.

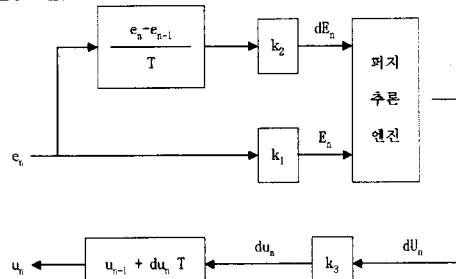
[표 2] 스택시플래이터에 적용된 보강된 퍼지제어 규칙

		dE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	ZO	PS	PM	PB	PM	PB	PB
	PM	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB
	PB	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PB

이때 [표 2]에서 보듯 퍼지 제어규칙은 대칭성을 갖지 않는데 이는 전압 강하시에는 일반적인 퍼지 제어규칙이, 전압 상승시에는 보강된 제어규칙이 적용되도록 보

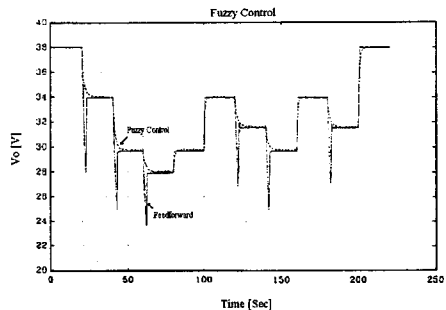
완(이하 보강된 퍼지 제어규칙이라 함)한 것이다. 제어시 사용된 제어상수는 제어주기  $T = 4.3$ [mSec], 비례 제어상수  $k_1 = 20.0$ , 미분제어상수  $k_2 = 0.1$ , 그리고 적분제어상수  $k_3 = 65$  이다. 제어순서는 다음과 같다.

- (1) Read Load Current( $I_o$ ) using Hall Effect Device and ADC
- (2) Calculate Target Voltage( $V_t$ ) and Read Output Voltage( $V_o$ )
- (3) Error( $E_r = V_t - V_o$ ), Error Variation Rate ( $dE = (E_r - E_o)/T$ )
- (4) Calculated  $dU$  Using Fuzzy Inference Engine
- (5) Calculate Drive Voltage( $V_u = V_u + dU \times T$ )
- (6) Drive  $V_u$  to DC Power Supply using DAC
- (7)  $E_o = E_r$



[그림 7] 퍼지제어기 구성도

[그림 8]은 퍼지 제어시 출력 전압 파형이다. 실험결과 대칭성을 갖는 일반 퍼지제어 규칙을 적용한 경우 PI 제어특성과 매우 유사하였으나, 보강된 제어규칙을 사용한 경우 전압 강하시는 PI제어특성을 유지하여 Overshoot를 대폭 감소하였으며, 전압 상승시는 Feed forward 특성과 유사하여 정상상태 도달시간이 크게 개선됨을 볼 수 있다.



[그림 8] Feed Forward 응답과 Fuzzy제어 출력비교

#### 4. 결 론

Feedforward 제어는 Power supply의 기계적 특성상 전압강하시 긴 안정상태 도달시간과 큰 Overshoot를 가지며, 전압상승시는 매우 빠르고 안정된 응답특성을 갖고, 비례적분(PI) 제어는 전압 강하시 발생하는 Overshoot는 대폭 감소한 반면, 전압 상승시 정상상태 도달시간이 길어진다. 그리고 Fuzzy 제어는 일반 퍼지 제어 규칙을 적용할 경우 PI 제어특성과 매우 유사하였으나, 전압 상승시 보강된 제어규칙을 사용한 경우 전압 강하시 발생하는 Overshoot 대폭 감소 및 전압 상승시 정상상태 도달시간도 크게 개선되었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 한 수빈, 이 원용, "PEM형 연료전지 스택시스템의 제어 기술 개발", 연료전지 자동차 기술 논문집, 1999
- [2] 정 봉만, "연료전지기술개발", 연료전지개발보고서, 1992