

## 연료전지 발전 시스템의 최적운전을 위한 지능제어 기법

(An Intelligent Control Method for Optimal Operation of a Fuel Cell Power System)

황진권\* · 최태일

(Jin-Kwon Hwang · Tae-II Choi)

### 요 약

연료전지 발전 시스템은 비선형성을 내포한 다수의 제어 루로들로 구성된 매우 복잡한 형태의 시스템이다. 연료전지 발전 시스템의 제어를 위하여 연료전지의 스택 모델이 개발되고 있으며 연료전지 발전 시스템의 간략화된 프로세스 흐름도도 제시되고 있다. 본 연구에서는 이러한 모델을 사용하여 연료전지 발전 시스템을 지능적으로 제어할 수 있는 I-SRG(Intelligent Setpoint Reference Governor)를 개발한다. I-SRG는 시스템의 제약조건과 성능목표에 대한 최적의 운전 설정치를 산출하고 각 제어 루프의 앞먹임 제어입력을 생성한다. I-SRG는 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 최적화 기법에 사용하고 신경회로망으로 구현되어진다. MCFC 발전 시스템의 전력 프로파일에 대한 추종 제어의 모의실험을 수행하여 제안된 I-SRG의 유용성을 보인다.

### Abstract

A fuel cell power plant is a very complex system which has various control loops with some non-linearity. For control of a fuel cell power plant, dynamic models of fuel cell stacks have been developed and simplified process flow diagrams of a fuel cell power plant has been presented. Using such a model of a Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) power plant, this paper deals with development of an intelligent setpoint reference governor (I-SRG) to find the optimal setpoints and feed forward control inputs for the plant power demand. The I-SRG is implemented with neural network by using Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm based on system constraints and performance objectives. The feasibility of the I-SRG is shown through simulation of an MCFC power plant for tracking control of its power demand.

Key Words : MCFC Power Plant, Setpoint Reference Governor, Feed Forward Control, Load Tracking, Plant Efficiency

### 1. 서 론

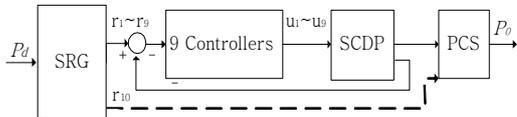
연료전지 발전은 수소와 산소의 화학반응에서 곧바로 전기를 생산하여서 발전효율이 높을 뿐만 아니라 저공해, 무소음 및 저진동 등의 장점을 갖고 있다. 또한, 연료전지 발전의 폐열을 지역난방 등에 사용

\* 주저자 : 우석대학교 소방안전학과 부교수  
Tel : 063-290-1477, Fax : 063-290-1478  
E-mail : jkhwang@woosuk.ac.kr  
접수일자 : 2009년 9월 3일  
1차심사 : 2009년 9월 7일  
심사완료 : 2009년 9월 15일



연료전지 발전 시스템의 최적운전을 위한 지능제어 기법

SCDP 연료전지 발전기에서 제어 시스템은 그림 2와 같이 SRG, 9개의 제어기 및 PCS(Power Conditioning System)로 구성될 수 있다. 여기서,  $r_1$ 에서  $r_9$  및  $u_1$ 에서  $u_9$ 는 9개 제어 루프에서 각기 기준 신호 및 제어입력이다. PCS에서 시간 지연은 9개의 제어 루프에서 그것들에 비하여 상대적으로 매우 작아서 무시가능하다. PCS는 PI 제어를 통한 PWM(pulse width modulation)의 시비율(duty ratio)로 연료전지의 DC 전류량을 조절하고 직류전원을 계통의 교류전원으로 변환한다. 그림 2에서 이 DC 전류량은 10번째 제어대상이고  $r_{10}$ 은 DC 전류의 기준신호다.



$P_d$  : DC Power demand,  $P_o$  : AC Power Output

그림 2. 연료전지 발전 시스템의 전체 제어 구조  
Fig. 2. Overall Control Structure of a fuel cell power plant

SRG는 기준신호  $r_1$ 에서  $r_{10}$ 을 9개 제어기들과 PCS에 제공하며, 이들 중에서  $r_4, r_8, r_9$  및  $r_{10}$ 의 4개 기준신호는 발전 요구량에 따라 가변되는 신호이다. 반면에,  $r_1, r_2, r_3, r_5, r_6$  및  $r_7$ 의 6개 기준신호들은 발전량과 관계없이 상수 값들로 설정될 수 있다. 가장 단순한 SRG 형태로는 몇 개 발전 요구량에 대한 기준신호의 설정 값을 나타낸 참조표(look-up table)와 이것들에 의한 보간 값을 사용하는 것이다.

각기 9개 제어 루프는 독립된 PI 제어기로 구현되고 있으며, 비정상적인 큰 제어입력의 생성을 방지하기 위하여[7] 모든 루프에 제어이득의 제약조건이 전제된다. MCFC 연료전지 발전 시스템의 비선형 특성 때문에 PI 제어기들은 모델 근간으로 설계되기가 어렵다. 안정한 제어이득을 설계하기 위하여 연료전지 발전 시스템의 공칭 모델을 약간씩 섭동하여 시행착오 방법에 의한 루프 튜닝 과정[8]이 사용되고 있다.

고온 연료전지의 전형적인 I-V 특성 곡선이 그림

3에 나타나 있고 이 전류-전압(I-V) 특성 관계를 통하여 연료 사용의 효율성을 제고할 수 있다. 셀의 전류량이 증가하면 활성화 전압손실, 저항 전압손실 및 수송 전압손실 등에 의하여 연료전지 전압은 감소한다. Nerst 방정식[9]에서 연료전지 전압은 압력, 반응물질과 생성물질의 분압에 의하여 결정되고 수송 전압손실은 이 분압 변화에 기인한다. 특정한 전류밀도에 이르게 되면 수송 전압손실은 매우 커지게 되고 연료전지 전압이 급격히 감소하게 된다. 전력이 증가에서 감소로 돌아서서기 시작하는 이 특정 전류 밀도 지점에서 연료전지의 발전량은 최대가 된다.

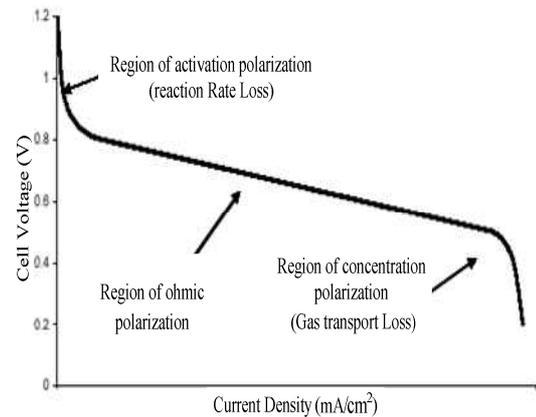


그림 3. 연료전지의 전압과 전류 특성  
Fig. 3. Characteristics of voltage and current in a fuel cell

연료전지의 발전량이 주어지면 I-V 특성 곡선에서 연료전지의 전류  $nI_{sys}$ 를 선정할 수 있다. 연료전지 발전 시스템에서 병렬 연결된 셀의 개수가  $N$ 이면 총 DC 출력전류는  $N \cdot I_{sys}$ 가 된다. 이 DC 출력전류의 생산에 필요한 수소 몰(mole) 연소속도  $mol_{H_2,used}$ 는 (1)과 같다.

$$mol_{H_2,used} = \frac{N \cdot I_{sys}}{2F} \quad (1)$$

여기서  $F$ 는 페러데이 정수로 1 몰 전자의 전하량이다.

연료전지 발전 시스템에서 수증기 공급속도는 다음과 같이 정의되는 탄소-수증기 몰 비율  $r_{s/c}$ 에 의하여 설정될 수 있다.

$$r_{s/c} \equiv \frac{\text{mol}(H_2O)}{\text{mol}(CH_4)} \quad (2)$$

탄소 침전 없이 메탄을 모두 개질하기에 필요한  $r_{s/c}$ 의 최소 값은 화학식 (3)에서 2 이상임을 알 수 있다.



연료전지 발전 시스템에서 연료사용 효율  $u_f$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$u_f \equiv \frac{\text{mol}_{H_2, \text{used}}}{\text{mol}_{H_2}} \quad (4)$$

여기서  $\text{mol}_{H_2}$ 는 연료전지 스택에 투입되는 수소의 몰 공급속도이다. 수송 전압손실을 감안하여서  $u_f$ 를 설정하는 것이 필요하다. 연료전지의 전류  $I_{sys}$ ,  $u_f$ 와  $r_{s/c}$  등에서 메탄 가스의 공급속도를 계산할 수 있고 본 연구에서는  $u_f$ 와  $r_{s/c}$ 를 각기 0.75와 2로 설정한다[6].

열적 시스템의 느린 동특성에 의하여 연료전지 발전 시스템의 제어과정에 과도기상태가 길어질 수 있다. 이러한 느린 과도응답특성을 개선하기 위하여 스택 온도 제어루프에 그림 1과 같이 앞먹임 제어가 사용된다. SCDP의 스택 온도 제어에서 기준 값은  $r_1$ 의  $1,250[^\circ\text{F}]$ 로 설정되며 앞먹임 제어입력의 산출에 발전 요구량을 사상한 비선형 함수  $f(P_d)$ 가 사용된다. 연료전지의 발전효율을 위하여 RU 입구 온도  $r_4$ 의 설정값은 발전 요구량에 따라서 가변되어야 한다. SCDP 연료전지 발전기에서 2,022[kW], 1,809 [kW] 및 1,452[kW]의 발전 요구량에 대하여 RU 입구 온도의 기준 값이 각기 1,069.2[ $^\circ\text{F}$ ], 1,056.5[ $^\circ\text{F}$ ] 및 1,044[ $^\circ\text{F}$ ]로 알려져 있다.

### 3. 지능 제어기 설계

기존 연료전지 발전 시스템에서 SRG는 비선형 함수나 참조표를 사용하여서 발전 요구량  $P_d$ 에 대한 기준신호 설정 값들을 산출한다. 따라서 이러한 기준신호 값들은  $P_d$ 가 변경되는 과도기상태 기간에서 최적의 값이 되기가 어렵다. 또한, 기존의 각기 PI 제어 루프마다 앞먹임 제어를 추가하여서 연료전지 발전 시스템의 느린 동특성을 좀 더 개선할 필요가 있다.

본 연구에서는 제안하려는 I-SRG (Intelligent SRG)의 제어 시스템 구조가 그림 4에 나타나 있다. 발전 요구량  $P_d$ 가 주어지면, I-SRG는 연료전지 발전 시스템에 부과된 제약조건을 만족시키면서 동시에  $P_d$ 의 생산오차와 연료 사용 등을 나타낸 목적 함수들을 최소화하는 제어입력  $\vec{u} = (u_1, u_2, \dots, u_{10})$ 을 구한다. 이 제어입력에서 RU 입구 온도의 기준 값과 스택 온도를 포함하여 모든 제어 루프의 앞먹임 제어입력들을 산출한다. I-SRG의 구현에 연산의 간결성과 빠른 수렴성의 특성을 갖는 PSO 및 비선형함수의 사상에 적합한 신경회로망을 사용한다.

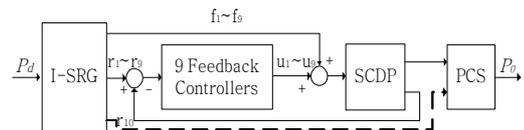


그림 4. I-SRG를 포함한 전체 제어 구조  
Fig. 4. Overall control structure with I-SRG.

I-SRG에 의한 제어기는 3 단계 설계로 나누어 구현될 수 있다. 첫 단계는 연료전지 발전량에 대한 제어입력  $\vec{u}$ 의 사용가능 범위  $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{10})$ 를 찾고 이것에서 연료전지 발전량 함수  $E(\vec{u})$ 와 RU 입구 온도 함수  $T(\vec{u})$ 를 구하는 것이다. 그 다음 단계는 연료전지 발전 시스템에서 사용될 목적함수들을 설정하고 이것들을 최소화시키는 제어입력  $\vec{u}^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_{10}^*)$ 을 찾는 것이다. 마지막으로 RU 입구 온도와 연료전지 발전량의 설정치를  $E(\vec{u}^*)$ 와

연료전지 발전 시스템의 최적운전을 위한 지능제어 기법

$T(\vec{u})$ 로 선정하고  $\vec{u}^*$ 를 앞먹임 제어입력으로 사용하는 것이다.

SCDP 연료전지 발전기에서  $\vec{u}$ 의 사용가능 범위  $\Omega$ 를 구하기 위하여 1,492[kW]부터 2,022[kW]까지 106[kW]씩 증가하여서 만든 6개의 발전량 값들을 선정하였다. SCDP의 연료전지 스택의 최대와 최소 허용온도는 각기 1,250[°F]와 700[°F]로 제한된다. 이 최소 허용 온도부터 최대 허용온도까지 10[°F] 단위로 증가하여서 만든 56개의 RU 입구 온도를 선정하였다. 각기 6개의 발전량 값들마다 56개의 RU 입구 온도 값들에 대하여 SCDP의 Matlab/simulink 모델을 모의실험하였다. 제어입력  $\vec{u}$ 가 정상상태에 도달할 수 있도록 SCDP 모델의 수행시간을 20,000[sec] 설정하였고 이 정상상태에서의  $\vec{u}$  값들을 수집하였다. 각기 발전량에 대하여 구해진  $\vec{u}$ 의 사용가능 범위 ( $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{10}$ )가 그림 5에 나타나 있고 각기  $\vec{u}$  신호의 최대 크기는 1로 정규화되어 있다.

발전량 설정 함수  $E(\vec{u})$ 와 RU 입구 설정 온도 함수  $T(\vec{u})$ 의 구현에 은닉층(hidden layer) 1 개를 가진 앞먹임(feedforward) 신경회로망을 적용하였고 은닉층은 21개 뉴런(neuron)으로 구성되었다. 신경회로망의 학습에 오류역전파(error back-propagation) 알고리즘을 사용하였다.  $E(\vec{u})$ 와  $T(\vec{u})$ 의 신경회로망 학습에 ( $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{10}$ ) 데이터를 사용하였고 2,000번의 반복학습 수행을 통하여  $E(\vec{u})$ 와  $T(\vec{u})$ 의 함수를 구하였다. 그림 6에 ( $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{10}$ )에서 60개 데이터에 대한  $E(\vec{u})$ 와  $T(\vec{u})$ 의 신경회로망 함수 값들이 나타나 있고 각기 2,022[kW]와 1,250[°F]를 1로 정규화하여 도시되어 있다. 그림 6에서 신경회로망 함수 값들과 실제 값들이 잘 일치함을 알 수 있다.

SCDP 연료전지 발전기에서 발전 생산오차 및 연료 사용량의 최소화를 위한 목적함수들을 각기 (5) 및 (6)과 같이 설정할 수 있다.

$$J_1(\vec{u}) = |P_d - E(\vec{u})| \quad (5)$$

$$J_2(\vec{u}) = u_s \quad (6)$$

$J_1(\vec{u})$ 과  $J_2(\vec{u})$ 의 최소화에 최대 편차함수  $\delta_{\max}$ 를

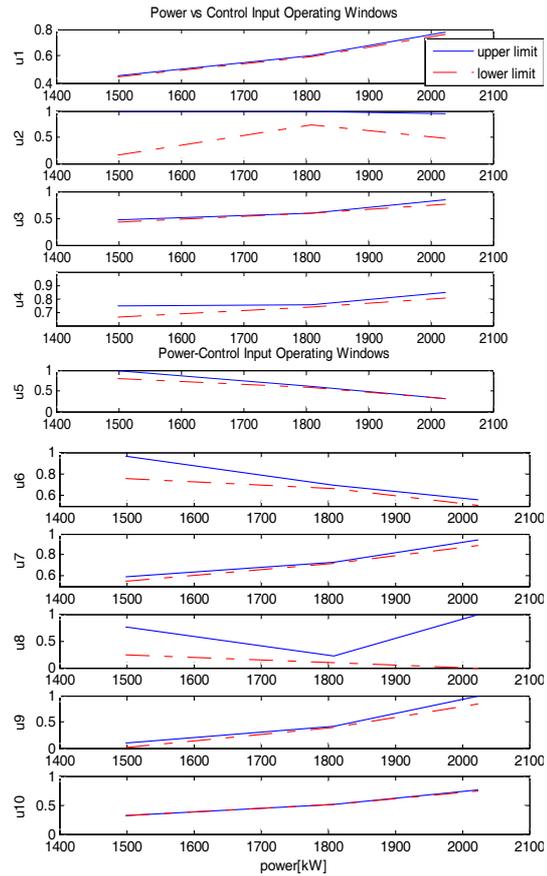


그림 5. 제어 입력의 운전 범위  
Fig. 5. Control input operating ranges

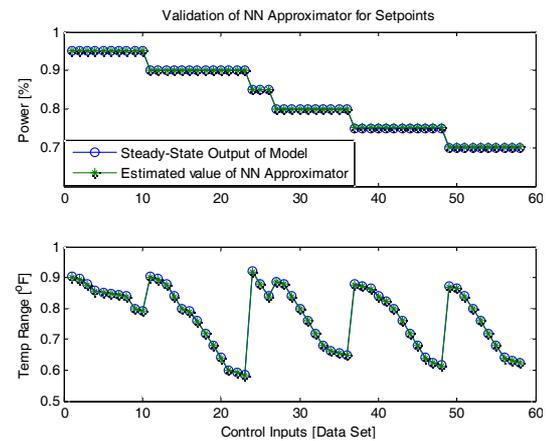


그림 6. 설정 값들에 대한 NN의 근사 값의 검증  
Fig. 6. Validation of NN approximation for setpoint

다음과 같이 정의한다.

$$\delta_{\max} = \max_{i=1,2} \delta_i, \delta_i \geq 0, i = 1, 2, \quad (7)$$

$$\delta_i = \beta_i |J_i(\vec{u}) - J_i(\vec{u}^*)|, \vec{u} \in \Omega \quad (8)$$

$$J_i(\vec{u}^*) = \min \{J_i(\vec{u}); \vec{u} \in \Omega\} \quad (9)$$

여기서  $\beta_i$ 는 각기 목적함수의 가중치이고  $\delta_i$ 는 가중 편차함수이고  $J_i(\vec{u}^*)$ 는  $\Omega$  영역에서  $J_i(\vec{u})$ 의 최소값이다.

PSO 알고리즘은 (8)의 다중 목적함수들의 최적의 해답  $\vec{u}^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_{10}^*)$ 를 구한다. 이 해답에서  $E(\vec{u}^*)$ 와  $T(\vec{u}^*)$ 를 산출할 수 있다. 또한,  $E(\vec{u}^*)$  값에서 DC 전류 기준신호  $r_{10}$ 을 산출할 수 있고 메탄 공급의 기준속도  $r_8$ 와 수증기 공급의 기준속도  $r_9$ 를 (2)와 (4)에서 계산될 수 있다.  $T(\vec{u}^*)$ 는 RU 입구 기준 온도  $r_3$ 로 설정되고  $u_1^*$ 에서  $u_9^*$ 는 앞먹임 제어입력  $f_1$ 에서  $f_9$ 의 값으로 각기 설정된다.

#### 4. 모의실험

I-SRG의 모의실험에 사용될 발전 요구량 프로파일은 그림 7에 실선으로 나타나 있고 발전량의 크기는 2,100[kW]를 1로 정규화한 것이다. 이 프로파일은 각기 다른 3개의 일정한 전력 값들 및 상승과 하강 기울기를 갖는 전력 값들로 구성되어 있다. 이 발전 요구량 프로파일을 사용하여 다음의 Case 1과 2에 대한 모의실험을 수행하였다.

Case 1: minimize  $J_1(\vec{u})$

Case 2: minimize  $J_1(\vec{u})$  and  $J_2(\vec{u})$

Case 1의 경우에서  $\vec{\beta} = [\beta_1, \beta_2]$ 는 [1, 0]이고 Case 2에서 [1, 0.001]이다.

Case 1과 2에 의하여 I-SRG로 구한  $E(\vec{u}^*)$ 도 그림 7에 나타나 있다. Case 1과 2의 발전 설정량  $E(\vec{u}^*)$ 는 프로파일의 발전 요구량과 유사하나  $J_2(\vec{u})$ 가 추가되어서 Case 2의 것이 모의실험 1의 것보다 전반적으

로 더 큰 오차를 가짐을 알 수 있다. 그림 8에 I-SRG로 구한 RU 입구 온도  $T(\vec{u}^*)$ 에서 1,056.5[°F]를 뺀 온도 곡선들이 도시되어 있으며 실선 곡선은 기존의 RU 입구 온도기준 값이다.  $T(\vec{u}^*)$ 는 발전 요구량의 변경되는 구간에서만 새로운 값으로 갱신됨을 알 수 있고 Case 1과 2의  $T(\vec{u}^*)$ 는 대체로 유사하나 기존의 기준 온도와는 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

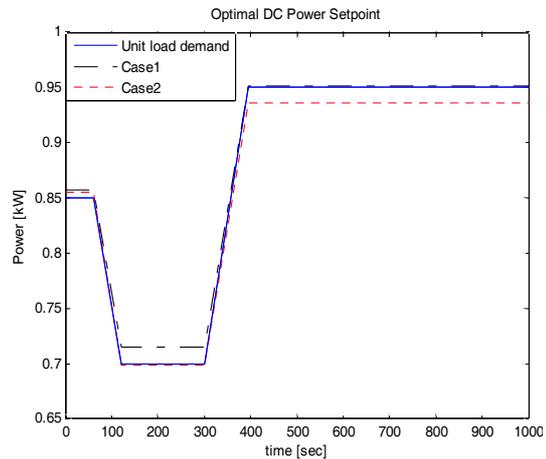


그림 7. 발전 설정치 궤적  
Fig. 7. Plant power setpoint trajectories

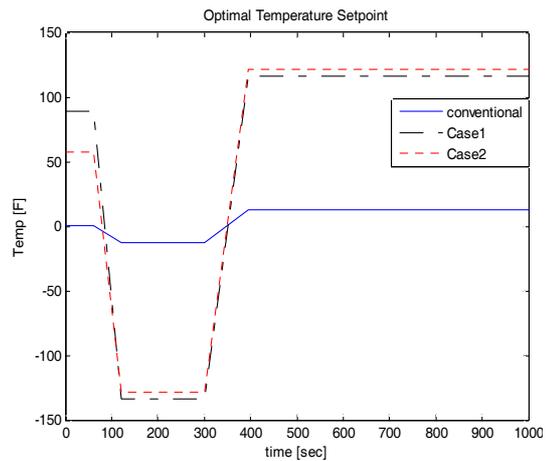


그림 8. RU 입구 온도 설정치 궤적  
Fig. 8. RU inlet temperature setpoint trajectories

Case 1과 2에서 I-SRG로 산출한  $E(\vec{u}^*)$ 와  $T(\vec{u}^*)$  그리고  $f_1$ 에서  $f_9$ 를 사용하여 SCDP 연료전지 발전

연료전지 발전 시스템의 최적운전을 위한 지능제어 기법

시스템을 모의실험하였다. 모의실험 결과의 발전 출력량과 RU 입구의 출력 온도는 각기 그림 7과 8의 설정치와 거의 동일하였으며 스택의 출력 온도 곡선이 그림 9에 도시되어 있다. Case 1의 모의실험 경우에 과도기 상태에서 스택 출력온도는 기존의 것보다 1,250[°F]에 보다 더 근접함을 알 수 가 있다. 반면에 Case 2의 모의실험 경우에 연료사용의 최소화에 의하여 과도기 상태가 20,000[sec] 이상 지속되고 온도의 변화량도 커짐을 알 수 있다.

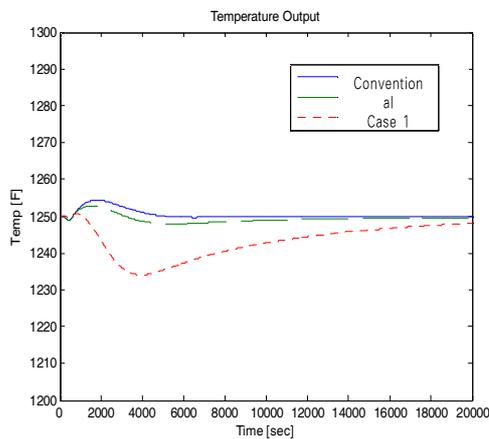


그림 9. 모의실험 결과의 스택 온도 출력  
Fig. 9. Stack Temperature outputs of simulation results

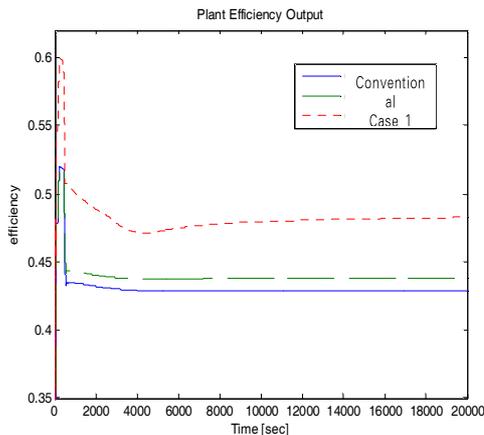


그림 10. 연료전지의 효율 비교  
Fig. 10. Comparison of fuel cell efficiency

모의실험의 연료전지 발전 시스템의 효율을 비교하기 위하여 다음과 같이 정의되는 발전 효율을 사용한다.

$$\eta = \frac{P_o}{P_{fuel}}, \quad (10)$$

$$P_{fuel} = M_{CHA} \cdot LHV_{CHA} \cdot mol_{CHA}.$$

여기서,  $mol_{CHA}$ 는 메탄의 몰 공급속도이고  $M_{CHA}$ 과  $LHV_{CHA}$ 은 각기 메탄의 몰 질량과 저위발열량(Lower Heating Value)이고 그 값들은  $M_{CHA} = 16[\text{kg}/\text{kmol}]$  및  $LHV_{CHA} = 50[\text{MJ}/\text{kg}]$ 이다. 모의실험에 의한 발전 효율들이 그림 10에 나타나 있다. 발전 요구량이 비교적 작은 400[sec] 이내의 구간에서 스택의 전압 손실이 작아서 발전효율이 상대적으로 크게 나타남을 확인 수 있다. I-SRG 도입에 의하여 발전효율이 기존의 것보다 향상됨을 알 수 있다. Case 2의 모의실험 경우에는 발전효율이 상당히 향상되나 그 반대 급부로 그림 7에서와 같이 발전 설정량에 오차가 있게 된다.

## 5. 결 론

연료전지 발전 시스템의 운전에서 해결할 중요한 문제는 시스템과 결합된 최적화 문제이다. 새로운 개념의 지능제어기인 I-SRG를 이러한 최적화 문제에 도입하였다. 본 연구에서는 발전 요구량의 추종과 발전효율의 최적화에 대한 I-SRG를 설계하였으며 그 구현에 PSO 알고리즘과 신경회로망을 사용하였다. 이 I-SRG는 최적의 시스템 설정치들을 산출할 뿐만 아니라 빠른 응답특성을 얻도록 앞먹임 제어입력도 생성하였다. SCDP 연료전지 발전 시스템의 모의실험을 통하여 I-SRG의 사용에 의하여 발전 요구량을 추종하면서 발전효율을 개선하는 것을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 우석대학교의 지원에 의하여 수행되었습니다.

## References

- [1] T. Shinoki, M. Matsumura, and A. Sasaki, "Development of an Internal Reforming Molten Carbonate Fuel Cell Stack," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, December, 1995.
- [2] Angelina, P., "Using selection to improve particle swarm optimization," Proceeding of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 84~89, 1998.
- [3] Neural Network TOOLBOX, For Use with MATLAB, User's Guide Version 4, The Math Works Inc., 2006.
- [4] T. P. O'shea and A. J. Leo, "The Santa Clara Demonstration Project 2-MW Direct Carbonate Fuel Cell Power Plant," 29th IECEC Meeting, pp. 817~822, Monterey, CA, 1994.
- [5] Lukas, M. D., K. Y. Lee, and H. Ghezal-Ayagh, "Modeling, Simulation, and Control of Direct Reforming Molten Carbonate Fuel Cell Power Plant," The Fourth IFAC Symposium on Power Plants & Power Systems Control, pp. 127~134, Apr. 26-29, 2000.
- [6] Lukas, M. D., K. Y. Lee, and H. Ghezal-Ayagh, "Modeling and Cycling Control of Carbonate Fuel Cell Power Plants," Control Engineering Practice, Vol. 10, pp. 197~206, 2002.
- [7] Kwakernaak, H. and R. Sivan, Linear Optimal Control Systems, Wiley, New York, 1972.

- [8] Shinskey. F. G., Process Control Systems, Application, Design, and Tuning, Mc-Graw Hill, New York, 1988.
- [9] Balmer, R, Thermodynamics, West, St. Paul, Minnesota, 1990.

## ◇ 저자소개 ◇

### 황진권 (黃鎭權)

1962년 3월 29일생. 1985년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1987년 동대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1987~1993년 삼성전자 전송연구실 선임연구원. 2003년~현재 우석대학교 소방안전학과 부교수.

### 최태일 (崔泰一)

1982년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1993년 Pennsylvania State 대학교 Electrical Engineering학과(석사). 1997년 동대학원 Electrical Engineering 학과 졸업(박사). 1982년~현재 한국전력 스마트 그리드 추진실 기술개발 팀장.