

## 고분자연료전지 발전시스템의 제어기설계에 관한 연구

김응석, 김철진  
한라대학교 제어계측공학과

### A Study on the Controller Design for PEM Fuel Cell Systems

Enug-Seok Kim, Cherl-Jin Kim  
Department of Control and Instrumentation Eng. Halla University

**Abstract** - In this paper, an observer-based PI controller will be developed for PEM fuel cell system. Nonlinear model of PEM fuel cell system is introduced to study the controller design problems. Sliding mode observer will be designed to estimate the cathode and anode pressures of PEMFC system. And a nonlinear state observer is also designed to estimate the other states such as supply manifold pressure, Oxygen pressure, Hydrogen pressure, return manifold pressure, etc. These estimated states are used to design the observer-based PI controller. The validity of the proposed controller will be verified by using computer simulation.

#### 1. 연료전지시스템 관측기 설계 모델

본 논문에서는 연료전지시스템의 과도상태 및 정상상태 압력 제어기 설계문제를 다룬다. 시스템 내부의 모든 상태를 관측할 수 있는 비선형 관측기를 설계하고, 관측기로부터 추정된 상태를 이용하여 PI제어기를 설계한다. 참고문헌 [2]에서 제시한 축차관측기를 이용하여 캐소드 및 애노드 압력 추정기를 설계한다. 이를 이용하여 추정한 캐소드 및 애노드 압력을 이용하여 캐소드 내부의 산소압력과 애노드 내부의 수소압력을 추정하는 비선형 관측기를 설계한다. 아래 그림1에 연료전지시스템 개략도를 나타내었다.

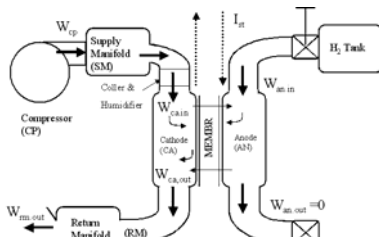


그림 1. 연료전지 시스템 개략도 [1].

Fig. 1 Simplified fuel cell reactant supply system [1].

본 논문에서 설계에 채택한 관측기들로부터 추정한 연료전지 시스템의 상태들은 실제 측정치 대신에 제어기설계에 사용된다. 본 논문에서는 여러 개로 구성된 연료전지 셀의 캐소드 및 애노드 각각의 부피들은 하나의 스택 내의 캐소드 및 애노드 부피로 간주하기로 한다. 캐소드압력 모델은 공기 압축기 동특성, 과급기(the supply manifold) 동특성 및 캐소드 동특성을 포함하고 있다. 캐소드 동특성은 질량보존의 법칙, 열역학 및 습공기 (psychrometric) 특성 등을 이용하여 모델링하였다[1]. 애노드압력 모델은 캐소드압력 모델과 매우 흡사하다. 수소저장탱크로부터 애노드 측에 순수한 수소가 공급되는 것으로 가정하였다.

$x^T = [\omega_{cp} \ p_{sm} \ p_{O_2} \ p_{N_2} \ p_{v,ca} \ p_{H_2} \ p_{v,an} \ p_{r,m}]$ ,  $u^T = [v_{cm} \ I_{st}]$ 로 정의하면 연료전지상태공간모델은 다음과 같다[7].

$$\dot{x}_1 = -a_{11}x_1 + b_{11}u_1 - a_{12}x_2 + d_{11} \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = -a_{22}x_2 + a_{21}x_1 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = -a_{33}x_3 - a_{34}x_4 - a_{35}x_5 + a_{32}x_2 + a_{38}x_8 - b_{32}u_2 \quad (3)$$

$$\dot{x}_4 = -a_{44}x_4 - a_{43}x_3 - a_{45}x_5 + a_{42}x_2 + a_{48}x_8 \quad (4)$$

$$\dot{x}_5 = -a_{55}x_5 - a_{53}x_3 - a_{54}x_4 + a_{52}x_2 + a_{58}x_8 + b_{52}u_2 - d_{51} \quad (5)$$

$$\dot{x}_6 = -a_{66}x_6 - a_{67}x_7 + a_{62}x_2 - b_{62}u_2 - d_{61} \quad (6)$$

$$\dot{x}_7 = -a_{77}x_7 - a_{76}x_6 + a_{72}x_2 - b_{72}u_2 - d_{71} \quad (7)$$

$$\dot{x}_8 = -a_{88}x_8 + a_{83}x_3 + a_{84}x_4 + a_{85}x_5 \quad (8)$$

$$y_1 = x_1, \ y_2 = x_2, \ y_3 = x_3 + x_4 + x_5 (=p_{ca}), \ y_4 = x_6 + x_7 (=p_{an})$$

이제  $A \in R^{8 \times 8}$ ,  $B \in R^{8 \times 2}$ ,  $D \in R^{8 \times 1}$ ,  $C \in R^{4 \times 8}$ ,  $y \in R^{4 \times 1}$ 로 정의하면 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + D \quad (9)$$

$$y = Cx$$

#### 2. 비선형 관측기 설계

캐소드와 애노드 각각의 압력은 연료전지 스택의 전압에 직접적으로 영향을 끼친다. 또한 연료전지 발생 전력 및 효율에 미치는 영향도 크다. 그러나 캐소드 및 애노드 측 내부의 압력을 직접 측정하는 것은 매우 어렵다[1]. 이러한 문제는 비선형 관측기를 이용하여 해결할 수 있으며, 관측된 변수들은 제어기 설계에도 적절히 이용할 수 있다. 기체 과급기 압력을 1차 필터를 통과시키고, 필터링된 과급기 압력을 슬라이딩 모드 관측기 설계에 이용하여 캐소드 및 애노드 압력을 추정한다. 추정된 캐소드 및 애노드 압력은 산소 및 수소 압력을 추정하기위한 비선형 상태 관측기 설계에 이용한다.  $x_1 = w_{cp}$ ,  $x_2 = p_{sm}$ 은 측정 가능하지만,  $x_3 + x_4 + x_5 = p_{ca}$ (캐소드압력)와  $x_6 + x_7 = p_{an}$ (애노드압력)는 직접 측정이 매우 어렵다. 따라서 먼저  $x_3 + x_4 + x_5 = p_{ca}$ (캐소드압력)와  $x_6 + x_7 = p_{an}$ (애노드압력)을 추정할 필요가 있다. 캐소드 압력  $p_{ca}$ 는 아래의 식을 만족한다.

$$p_{ca} = a_{ca,1} \frac{dp_{sm}}{dt} + p_{sm} - a_{ca,2} W_{cp} \quad (10)$$

위의 식을 고이득관측기를 이용하면 다음과 같다.

$$p_{f,ca} = \frac{1}{\mu_{f1}s + 1} p_{ca} = y_{3f} \quad (11)$$

식(11)에 식(10)을 대입하여 정리하면

$$p_{f,ca} = \frac{a_{ca,1}}{\mu_{f1}} p_{sm} + (1 - \frac{a_{ca,1}}{\mu_{f1}}) p_{smf} - a_{ca,2} W_{cpf} \quad (12)$$

여기서  $p_{smf}$ ,  $W_{cpf}$ 는  $p_{sm}$ ,  $W_{cp}$ 의 필터링값이다. 위의 식(12)를 이용하면 측정 가능한  $p_{sm}$ 과  $W_{cp}$ 만을 이용함으로써  $p_{ca}$ 를 오차범위  $O(\mu_{f1})$  이내로 정확히 추정할 수 있다. 애노드압력  $p_{an}$ 에 대해 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_{an} = a_{an,1} \frac{dp_{sm,an}}{dt} + p_{sm,an} \quad (13)$$

고이득관측기를 이용하면 아래와 같이 정리된다.

$$p_{f,an} = \frac{1}{\mu_{f2}s+1} p_{an} = y_{4f} \quad (14)$$

식(14)에 식(13)을 대입해서 정리하면

$$p_{f,an} = \frac{a_{an,1}}{\mu_{f2}} p_{sm,an} + \frac{1-(a_{an,1}/\mu_{f2})}{\mu_{f2}s+1} p_{sm,an} \quad (15)$$

식(15)를 이용하면 측정 가능한  $p_{sm,an}$  만 이용하여  $p_{an}$ 을 오차범위  $O(\mu_{f2})$  이내로 추정할 수 있다. 이들 추정치를 이용하여 상태관측기를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + \hat{D} + \xi_z + K(\hat{y} - y_f) \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $K(\in R^{8 \times 4})$ 은 관측기이득행렬이며,  $y_f = [y_1 \ y_2 \ y_{3f} \ y_{4f}]^T$ ,  $y_{3f} = p_{f,ca}$ ,  $y_{4f} = p_{f,an}$ ,  $\hat{y}_f = \hat{y} - y_f$ ,  $\xi_z = \beta C^T \xi(\hat{y}_f)$ ,  $\xi(\hat{y}_f) (\in R^{4 \times 1})$ 이다.

$$\xi(\hat{y}_f) = \begin{cases} 1, & \hat{y}_f > \delta_f \\ \hat{y}_f/\delta_f, & -\delta_f \leq \hat{y}_f \leq \delta_f \\ -1, & \hat{y}_f < -\delta_f \end{cases} \quad (17)$$

여기서  $\delta_f (>0)$ 은 설계 파라미터이다. 상태관측오차  $\tilde{x} = \hat{x} - x$ 에 대해서  $3p_{\min} \|\tilde{y}_f\| \leq \|P\tilde{x}\| \leq 3p_{\max} \|\tilde{y}_f\|$ 와  $PA_c + A_c^T P = -Q$ 을 만족하는 행렬  $P (= P^T > 0)$ 와 행렬  $Q (= Q^T > 0)$ 에 상태관측 오차는  $E_R = \left\{ V, \|\tilde{x}\| \mid V \leq \frac{4\lambda_{PK_{\max}}^2}{\lambda_{Q_{\min}}^2} c_{f1}, \|\tilde{x}\| \leq \frac{2\lambda_{PK_{\max}} \lambda_{P_{\max}}^{1/2}}{\lambda_{Q_{\min}}} c_{f1} \right\}$ 로 수렴한다.

### 3. 제어기 설계

이 절에서는 연료전지 스택의 캐소드 및 애노드의 압력 제어를 설계하는 문제를 다루기로 한다. 이번에는 식(3)~(5)로 주어진 캐소드압력 상태공간모델에 대한 제어기 설계문제만 다루기로 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ca} &= A_{ca}x_{ca} + B_{ca}u_{ca} + D_{ca}, \\ y_{ca} &= C_{ca}x_{ca} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{여기서 } A_{ca} = \begin{bmatrix} -a_{33} & -a_{34} & -a_{35} \\ -a_{43} & -a_{44} & -a_{45} \\ -a_{53} & -a_{54} & -a_{55} \end{bmatrix}, \quad C_{ca} = [1 \ 1 \ 1], \quad B_{ca} = [a_{32} \ a_{42} \ a_{52}]^T,$$

$D_{ca} = [a_{38}x_8 - b_{32}u_2 \ a_{48}x_8 \ a_{58}x_8 + b_{52}u_2 - d_{51}]^T$ 이다.  $u_{ca} = x_2$ 로서 공기과급기 내의 압력으로서 캐소드압력에 대한 제어입력으로 간주한다.

본 논문에서는 상태  $x_1, x_2$ 로 표현된 공기압축기 회전속도  $w_{cp}$ 와 공기과급기 내의 압력  $p_{sm}$ 은 시스템의 다른 상태에 비해 빠르게 변하며 제어가 용이하므로 원하는 상태(캐소드압력 제어입력)로 매우 잘 제어된다고 가정하기로 한다. 이제  $u_{ca}$ 는 다음과 같이 설계한다.

$$u_{ca} = L_{ca}(y_v - \hat{y}_{ca}) \quad (19)$$

위의 제어기를 상태방정식으로 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$u_{ca} = L_{ca}C_{ca}(x_r - \hat{x}_{ca}) \quad (20)$$

### 4. 시뮬레이션

이 절에서는 앞에서 소개한 연료전지 시스템 식(1)~(8)에 대한 관측기 식(16)과 제어기 식(20)에 대한 컴퓨터 모의실험 결과를 검토하기로 한다. 상태관측기의 설계 파라미터는  $\beta_1 = 100$ ,  $\delta_{f1} = 0.001$ ,  $K^T = [100 \ 100 \ 100]$ , 고이득관측기 이득은  $\mu_{f1} = 0.001$ 으로 하였다.

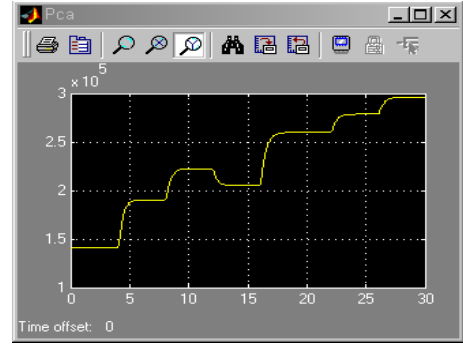


그림 2. 캐소드 압력  $p_{ca}$  [Pa].  
Fig. 2. Cathode pressure  $p_{ca}$  [Pa].

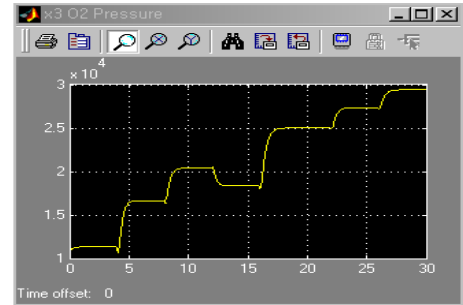


그림 3. 캐소드 산소압력  $x_3 (= p_{O_2})$  [Pa].  
Fig. 3.  $O_2$  pressure  $x_3 (= p_{O_2})$  [Pa].

### 5. 결 론

본 논문에서는 고분자 연료전지 시스템에 대한 상태관측기를 이용한 제어기 설계 문제를 다루었다. 고분자 연료전지 시스템의 비선형 모델을 관측기 설계에 적용하였다. 고이득관측기를 이용하여 캐소드 압력과 애노드압력을 추정하였고, 이를 비선형 상태관측기 설계에 이용함으로써 캐소드 내 산소압력과 애노드내 수소압력을 정확히 추정할 수 있음을 보였다. 제한한 관측기를 이용하여 PI제어기에 근거한 스택압력제어기를 설계하였다. 향후 파라미터 불확실성을 고려한 적응제어기 설계 문제를 다룰 필요가 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J. T. Pukrushpan, H. Peng, and A. G. Stefanopoulou, "Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems," Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 126, pp.14-25, March 2004.
- [2] D. H. Kim, H. O. Wang, and E. S. Kim, "Cascade Observers for Nonlinear Systems and Application to Nonlinear Output Feedback Control," JSME International Journal, Vol.49, No.2, pp.463-472, June 2006.
- [3] J. T. Pukrushpan and A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer, 2004.
- [4] K. Dannenberg, P. Ekdunge and G. Lindbergh, "Mathematical model of the PEMFC," Journal of Applied Electrochemistry, Vol.30, pp.1377-1387, 2000.
- [5] M. Arcak, H. Gorgun, L. M. Pedersen and S. Varigonda, "An Adaptive Observer Design for Fuel Cell Hydrogen Estimation," Proc. American Contr. Conf., Denver, Colorado, June 4-6, 2003, pp.2037-2042.
- [6] E. S. Kim, C. J. Kim and K. S. Eom, "Nonlinear Observer Design for PEM Fuel Cell Systems," Proc. of ICEMS 2007, Seoul, Oct. 8~11, 2007, pp.1835-1839.
- [7] E. S. Kim, C. J. Kim, "Nonlinear Observer Design for PEM Fuel Cell Systems," Trans. on KIEE, Vol.58, No. 2, pp.314-321, 2009.