

연료전지의 모델링과 정출력 적응제어기 설계

현근호, 가출현  
 신성대학 디지털전기계열

Modelling of the Fuel Cell and Design of an Adaptive Controller for Steady Power

Keun-Ho Hyun, Chul-Hyun Ka  
 Department of Digital Electrical Engineering, Shinsung College

**Abstract** - In this paper, the dynamic models of SOFC are suggested. It consists of electrochemical model, thermal model, voltage equation and several loss equations. Control problems on tracking steady voltage by air flow is discussed and an adaptive controller is designed to withstand to the variation of stack current. Simulation is done to prove the solution of control algorithms.

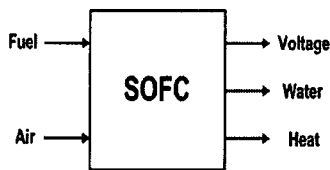
1. 서 론

연료전지는 모듈화, 고효율성 및 환경친화적인 특성으로 인하여 미래의 전력으로써 각광받고 있다. 그러나, 연료전지 자체의 동특성으로 인하여 이와 연결된 전력시스템의 동특성에도 영향을 줄 수 있으므로 특성분석이나 제어기 설계시 정확한 모델링이 요구된다. 전력플랜트에 사용되는 연료전지는 보통 고체산화 연료전지(SOFC : Solid-Oxide Fuel Cell)와 용융탄산염 연료전지(MCFC : Molten-Carbonate Fuel Cell)가 있고 각각의 동특성을 갖고 있으며 일반적으로 독립시스템으로 다루는 경우가 대부분이다. 본 논문에서 제시한 모델은 고체산화 연료전지에 관한 것으로서 스택 내부에서의 전기화학 및 열에 대한 화학반응을 다룬다. 또한, 활성화손실, 집중화손실 및 저항손실에 따른 전압손실을 고려하여 정전압 특성을 위한 적응제어기의 설계와 타당성 확인을 위한 시뮬레이션도 수행하고자 한다.

2. 본 론

2.1 고체산화 연료전지의 모델링

본 논문에서 제시한 고체산화 연료전지의 동특성모델은 화학, 열 및 전기적인 특성을 고려하였으며 그림 1과 같이 기본적으로 두 개의 입력과 세 개의 출력을 갖고 있다. 즉, 수소연료( $H_2$ )와 산소( $O_2$ )가 입력이고 직류전압( $V_{dc}$ ), 물( $H_2O$ ) 및 열( $T$ )이 출력이다.



<그림 1> 고체산화 연료전지 스택의 입출력

연료, 물 및 공기에 대한 전기화학 모델은 각 성분별 물질균형식(material balance equation)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{\tau_1}x_1 + \frac{1}{\tau_1 K_1}N_1^i - \frac{K_r}{\tau_1 K_1}I_{st} \quad : \text{연료의 흐름} \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{\tau_2}x_2 + \frac{K_r}{\tau_2 K_2}I_{st} \quad : \text{물의 흐름} \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{\tau_3}x_3 + \frac{1}{\tau_3 K_3}N_3^i - \frac{K_r}{\tau_3 K_3}I_{st} \quad : \text{공기의 흐름} \quad (3)$$

$$\tau_1 = \frac{W}{K_1 RT}, \tau_2 = \frac{W}{K_2 RT}, \tau_3 = \frac{W}{K_3 RT} \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{N_1^r}{x_1}, K_2 = \frac{N_2^r}{x_2}, K_3 = \frac{N_3^r}{x_3} \quad (5)$$

여기서,  $x_1, x_2, x_3$ 는 연료, 물 및 공기의 몰분율(mole fraction),  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ 는 시상수(time constant),  $K_1, K_2, K_3$ 는 몰상수(molar constant)를 나타낸다. 또한,  $N_1^i, N_3^i$ 는 입력인 연료와 공기의 흐름 속도,  $N_1^r, N_3^r$ 는 반응속도를 나타내며  $K_r = 0.25N/F$ 는 반응식에서 패러데이(Faraday)상수  $F$ 와 전자수  $N$ 으로 결정되는 상수이다.  $I_{st}$ 는 스택전류이고,  $W$ 는 스택의 체적,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 셀온도이다. 에너지 균형식에 의하여 표현할 수 있는 열모델은 다음과 같다.

$$M_p C_p \dot{T} = q_e W_e + \sum Q_j \quad : \text{열 동특성} \quad (6)$$

여기서,  $M_p$ 는 질량,  $C_p$ 는 열용량,  $W_e$ 는 체적,  $q_e$ 는 셀당 열발생량,  $Q_j$ 는 셀과 분리기 사이의 총 열이다. 스택의 출력전압과 저항, 집중 및 활성화손실은 네른스트 공식(Nernst equation)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$V_{dc} = V_0 - \eta_{ohm} - \eta_{con} - \eta_{act} \quad : \text{총 출력전압} \quad (7)$$

$$V_0 = N_0 \left[ E_0 + \frac{RT_0}{2F} \ln \frac{x_1 \sqrt{x_3}}{x_2} \right] \quad : \text{스택의 출력전압} \quad (8)$$

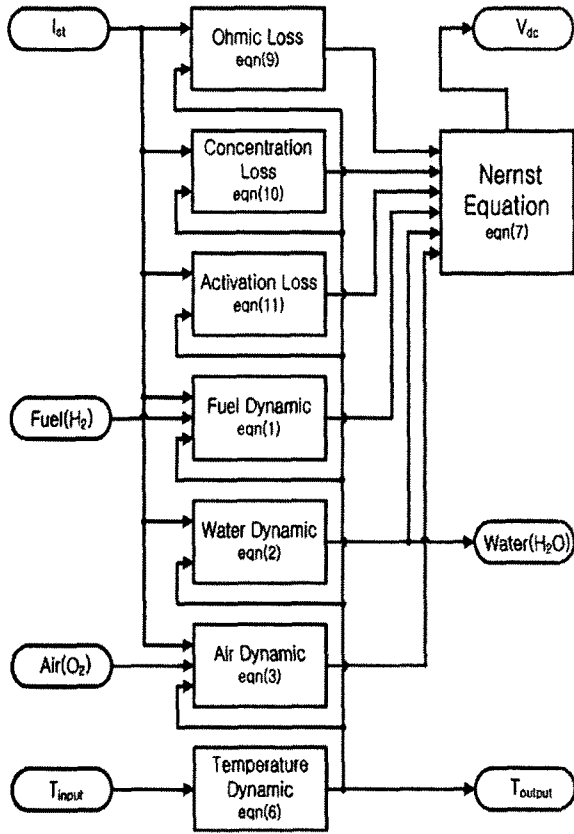
$$\eta_{ohm} = r I_{st} \quad \text{at} \quad r = \alpha \exp \left[ \beta \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad : \text{저항손실} \quad (9)$$

$$\eta_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{I_{st}}{i_L} \right) \quad : \text{집중손실} \quad (10)$$

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \left( \frac{I_{st}}{i_0} \right) \approx a + b \ln(I_{st}) \quad : \text{활성손실} \quad (11)$$

여기서,  $N_0$ 는 스택의 셀수,  $E_0$ 는 셀의 표준 역전위,  $T_0$ 는 상온,  $r$ 은 오옴저항,  $\alpha, \beta$ 는 저항계수,  $n$ 은 반응전자수,  $i_L$ 은 제한전류,  $a, b$ 는 각각 타펠(Tafel)상수 및 경사값이다. 식(7)~식(11)은 스택이 수소와 공기에 의해서만 작동하고, 셀 내의 기체분포는 일정하며 셀 간의 열전달은 전혀 없으면서, 내부 및 외부 채널 사이의 압력비율은 충분히 크다는 가정 하에 성립할 수 있다.

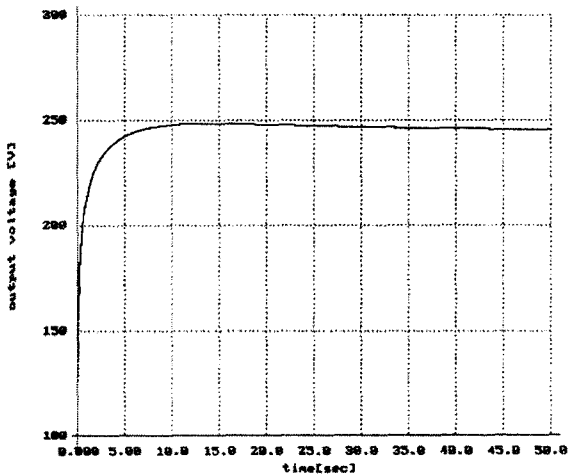
이상의 모든 수식을 종합하여 고체산화 연료전지의 동특성 모델을 그림 2와 같이 표현하였다.



<그림 2> 고체산화 연료전지(SOFC) 모델링 결과

2.2 정출력 제어기 설계

스택전류를 일정한 값으로 유지하였을 경우 스택의 출력전압에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 3에 제시하였다.



<그림 3> 스택 출력전압( $V_{dc}$ ) 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 대상시스템은 정격출력 100[kW], 정격 스택전압 286.3[V], 정격 스택전류 300[A]의 고체산화 연료전지로 설정하였으며 온도변화는 무시하였다. 시뮬레이션에 필요한 시스템 파라미터 및 데이터를 표 1과 같이 정리하였다.

그림 3과 같이 스택 출력전압은 원하는 일정한 값으로 수렴할 수도 있지만 스택전류와 같은 시스템 파라미터의 변동으로 약간의 오차 및 지속적인 하락이 발생할 수도 있다. 따라서, 파라미터의 변동에 관계없이 기준 출력전압을 유지할 수 있도록 적응제어기의 설계

<표 1> 시뮬레이션에 필요한 시스템 파라미터와 데이터

기 호	설정값[단위]	기 호	설정값[단위]
$\tau_1$	1.0[sec]	$T$	1000[°C]
$\tau_2$	2.0[sec]	$T_0$	923[°C]
$\tau_3$	1.5[sec]	$N_0$	384
$K_1$	0.8	$E_0$	0.8[V]
$K_2$	0.2	$\alpha$	0.2
$K_3$	0.9	$\beta$	-2870
$N_1^i$	12.0[mole/sec]	$I_{st}$	300[A]
$N_3^i$	24.0[mole/sec]	$i_L$	500[A]
$K_r$	0.01	$a$	0.05
$R$	8.31[J/mole°K]	$b$	0.11

가 필요하다. 즉, 연료의 흐름  $N_1^i$ 이 일정하다고 가정하고, 스택전류  $I_{st}$ 를 미지의 파라미터  $\theta$ 로 설정하여 출력전압  $V_{dc}$ 가 기준전압  $V_{dc}^*$ 를 추종하도록 공기의 흐름  $N_3^i$ 를 제어입력  $u$ 로 하는 제어기를 설계하도록 한다. 우선, 제어목적에 따라 전압추종오차  $e$ 와 미지파라미터 추정오차  $\hat{\theta}$ 를 다음과 같이 각각 정의한다.

$$e = V_{dc} - V_{dc}^*, \quad \hat{\theta} = \theta - \hat{\theta} \quad (12)$$

여기서,  $\theta$ 는 상수값이고  $\hat{\theta}$ 는 미지 스택전류의 추정값이며 리아프노프함수(Lyapunov function)를 다음과 같이 설정하였다.

$$U_L = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2\gamma}\hat{\theta}^2 \quad (13)$$

여기서,  $\gamma$ 는 적응이득이다. 식(9)~식(11)의 손실값이 상대적으로 적다면 리아프노프 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{U}_L &= e\dot{e} + \frac{1}{\gamma}\hat{\theta}\dot{\hat{\theta}} = e\dot{V}_{dc} - \frac{1}{\gamma}\hat{\theta}\dot{\hat{\theta}} \\ &= ce(g_1 + g_2\hat{\theta} + g_3u) + g_2\hat{\theta} - \frac{1}{\gamma}\hat{\theta}\dot{\hat{\theta}} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $g_1 = -\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{2\tau_3} + \frac{N_1^i}{\tau_1 K_1 x_1}$ ,  $g_2 = -\frac{K_r}{\tau_1 K_1 x_1} + \frac{K_r}{\tau_2 K_2 x_2} - \frac{K_r}{2\tau_3 K_3 x_3}$ ,  $g_3 = \frac{1}{2\tau_3 K_3 x_3}$ ,  $(15)$

그리고  $c = \frac{N_0 RT_0}{2F}$ 이다. 이제 적응칙과 제어칙을 다음과 같이 선택한다.

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma g_2 \quad : \text{적용칙(adaptive law)} \quad (16)$$

$$u = -\frac{1}{g_3} \left( \frac{k}{c}e + g_1 + g_2\hat{\theta} \right) \quad : \text{제어칙(control law)} \quad (17)$$

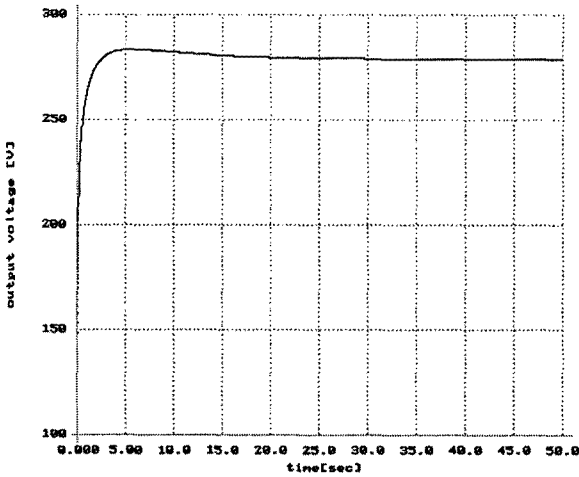
여기서,  $k$ 는 제어이득이며 식(16), 식(17)의 제어기를 적용하면 식

(14)의 리아프노프 도함수는 다음과 같이 정리된다.

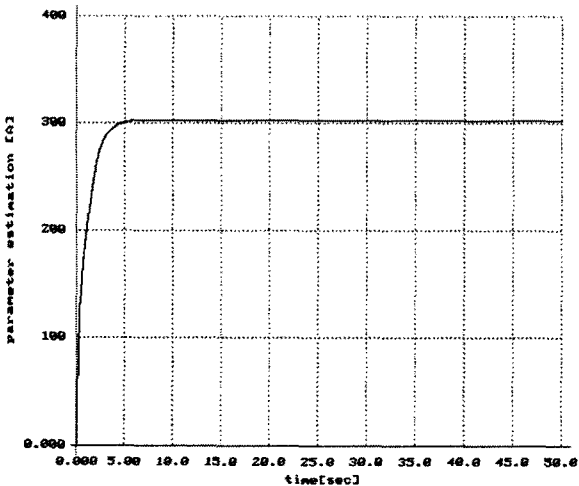
$$\dot{U}_L = -ke^2 \leq 0 \quad (18)$$

바발랏의 정리(Barbalat's lemma)[6]를 이용하면, 식(18)에 의하여  $U_L(t)$ 은 시간이 무한대로 갈 경우 영으로 수렴하며 따라서, 전압추종오차  $e$ 도 영으로 수렴하여 결과적으로 제시한 적응제어시스템의 안정도도 보장된다.

제시된 제어기의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였으며 설계파라미터로서 제어이득과 적용이득은 각각  $k=1$ ,  $\gamma=0.1$ 으로 하였고 기준전압은  $V_{dc}^* = 280[V]$ 로 하였다. 그림 4는 시뮬레이션 결과로써 스택의 전압값이 기준전압을 추종하고 있으며 미지파라미터 추정값  $\hat{\theta}$ 도 일정한 값으로 수렴하고 있다.



(a) 스택 출력전압 ( $V_{dc}$ )



(b) 파라미터 추정 ( $\theta$ )  $\Rightarrow$  스택전류 ( $I_{st}$ )

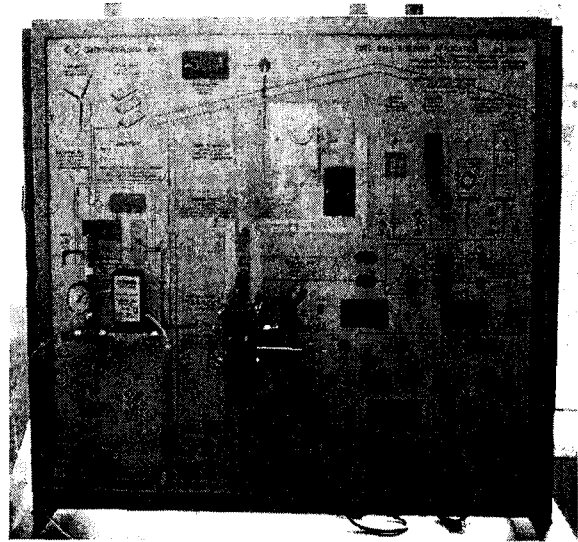
<그림 4> 제시된 제어기에 대한 시뮬레이션 결과

### 3. 결 론

본 논문에서는 고체산화 연료전지(SOFC)에 대한 동특성 모델링을 수행하였으며 전기화학적 모델과 열 모델, 전압식 및 손실식으로 구성하였다. 공기의 흐름을 이용한 정전압 추종제어를 적응제어기의 설계로 해결하였으며 스택전류의 변동에 따른 영향을 없애도록 설

계하였다.

제시된 제어기의 타당성은 시뮬레이션으로 입증하였으며 차후 그림 5와 같은 실제의 연료전지 실험시스템을 대상으로 본 논문의 타당성을 입증할 예정이다.



<그림 5> 현재 실험중인 연료전지 실험시스템

### [참 고 문 헌]

- [1] K.Sedghisigarchi and A.Feliachi, "Dynamic and Transient Analysis of Power Distribution Systems with Fuel Cells - Part I : Fuel-Cell Dynamic Model", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.19, No.2, pp.423~428, 2004
- [2] K.Sedghisigarchi and A.Feliachi, "Dynamic and Transient Analysis of Power Distribution Systems with Fuel Cells - Part II : Control and Stability Enhancement", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.19, No.2, pp.429~434, 2004
- [3] M.Tanrioven and M.S.Alam, "Modeling, Control and Power Quality Evaluation of a PEM Fuel Cell Based Power Supply System for Residential Use", IEEE IAS pp.2808~2814, 2004
- [4] F.Jurado and J.R.Saenz, "Adaptive Control of a Fuel Cell-Microturbine Hybrid Power Plant", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.18, No.2, pp.342~347, 2003
- [5] J.M.Correa, F.A.Farret, J.R.Gomes and M.G.Simoes, "Simulation of Fuel-Cell Stacks using a Computer-Controlled Power Rectifier with the Purposes of Actual High-Power Injection Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.39, No.4, pp.1136~1142, 2003
- [6] J.J.E.Slotine and W.Li, "Applied nonlinear control", Prentice-Hall, Englewood cliffs, NJ, 1991