溶融炭酸塩形燃料電池のフィードバック 線形化による制御系の構成*

福沢 充孝^{*1}, 曹 広 益^{*2}, 増淵 正美^{*3}

Control of MCFC by Feedback Linearization Technique

Mitsunori FUKUZAWA, Guang-yi CAO and Masami MASUBUCHI

Fuel cells, which have been given much attention in recent years, are now actively being studied and developed. However, their dynamic behaviors have not been fully discussed due to their complicated structures. This paper first explains the nonlinear dynamic models which show temperature behaviors by considering heat and mass balances in the cell. Then, we attempted to construct a control system by using feedback linearization to compensate for the effect of load change. Finally, it is shown by computer simulation that this system is quite effective.

Key Words: Modeling, Nonlinear Control, Process Control, Molten Carbonate Fuel Cell, Feedback Linearization, Control System, Load Change, Computer Simulation

1. 序 論

1973年の第一次石油危機以降、石油資源枯渇に対する危機感により、新エネルギーの技術開発の必要性が認識されると同時に環境汚染の問題等により、我が国でもサンシャイン計画、ムーンライト計画という国家的規模での開発が進められてきた。このような状況下で、環境適合性の高い新技術として太陽電池、風力発電とともに燃料電池がクローズアップされてきた。燃料電池は電気化学反応による直接発電方式で、高い発電効率と低公害性であるため、脚光を浴びている⁽¹⁾⁽²⁾。本研究で対象としている第二世代の溶融炭酸塩形燃料電池(MCFC)は650°Cという高温で動作し、電池内の化学反応や内部抵抗などによる発熱があり、これによって熱応力、電解質液の腐食といった問題が起り、電池性能はもとより電池構造までも破壊してしまう可能性がある。実用化に向けて燃料電池の安定な運転、長寿命化、効率の運転を維持するために負荷などの変動に対して電池内を適正な温度範囲に保つ必要

がある。また、高温にさらされる電池の構成部材が熱応力や熱疲労によって破損することを防ぐために、温度分布をできるだけ均一に保たなければならない。そのためには、電池内温度の動的な応答とその分布を把握しておくことが必要となる。しかし従来は、電池内が複雑であるという理由から動的モデルを用いた研究は非常に少なく^{(3)~(5)}、ハード面の開発や実験中心の研究、静特性に関する研究が主となっている⁽²⁾。著者らは、燃料電池内の熱移動や物質移動を考慮し、温度挙動を表す動的な分布系モデル、集中系モデルを作成してその妥当性を検証してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。

燃料電池の構造は非線形が強いが、本報告では簡単化のため集中系モデルを対象とし、その温度安定化を目的として、フィードバック線形化手法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を用いて、特に必要とされる負荷変動の影響を補償するための制御系を構成し、その効果を示す。

2. 動的モデリング

電池本体内の温度を制御するため、その熱収支を数学モデルで表すことにする。モデリングでは単セルを対象にし、以下の仮定を設けることにする。

・ガス流れ方式では燃料ガスと酸化剤ガスが並行して流れる並流形とする。

* 1994年9月21日 日本機械学会東北支部石巻地方講演会において講演、原稿受付 1995年1月19日。

^{*1} 正員、横河電機(株) (〒180 武蔵野市中町2-9-32)。

^{*2} 正員、電力中央研究所 (〒240-01 横須賀市長坂2-6-1)。

^{*3} 正員、大阪大学名誉教授。

Fig. 1 Heat transfer and generation

・燃料ガス、酸化剤ガス内の流動方向の熱伝導、電極電解質板、セパレータ内での横方向への熱伝導、反応ガスの移動による伝熱量は小さく無視でき、温度分布はないとする。

・燃料ガス、酸化剤ガスの電池内での反応に伴うガス組成変化は省略する。

溶融炭酸塩形燃料電池内の化学反応は

となるが、アノード極での H_2O の生成に伴い生成熱が電極電解質板上で発生する。また、アノード極とカソード極間で電荷 2e^- が移動することにより抵抗発熱が同じく電極電解質板上で発生する。熱の発生はこの二つが主なる原因となっている。モデリングで考慮する熱移動、物質移動を図1に示す。

- (a) : 燃料ガス投入熱量
- (b) : 燃料ガス-電極電解質板間の熱伝達
- (c) : 燃料ガス-セパレータ間の熱伝達
- (d) : 酸化剤ガス投入熱量
- (e) : 酸化剤ガス-電極電解質板間の熱伝達
- (f) : 酸化剤ガス-セパレータ間の熱伝達
- (g) : H_2O の生成発熱
- (h) : 電気抵抗発熱
- (i) : 電極電解質板-セパレータ間の放射伝熱

である。

集中系モデルは図1の(a)～(i)を考慮して以下のようなになる。

〈燃料ガス〉

(a)～(c)を考慮して、微小時間内 Δt における熱収支は

$$C_f \Delta \theta_f = [q_f(\theta_{fo} - \theta_f)_{(a)} + k_{ef} A(\theta_e - \theta_f)_{(b)} + k_{sf} A(\theta_s - \theta_f)_{(c)}] \Delta t$$

$$C_f = P_f \rho_f S_f X, \quad q_f = P_{fo} \rho_{fo} S_f v_f$$

したがって、

$$C_f \frac{d\theta_f}{dt} = q_f(\theta_{fo} - \theta_f) + k_{ef} A(\theta_e - \theta_f) + k_{sf} A(\theta_s - \theta_f) \dots \dots \dots (1)$$

C_f : 燃料ガス流路の熱容量 J/K

q_f : 投入燃料ガス熱容量 J/(s・K)

P : 比熱 J/(kg・K)

ρ : 密度 kg/m³

S : 流路断面積 m²

X : 電池横幅 m

v : ガス流速 m/s

θ : 温度 K

k : 熱伝達率 J/(s・m²・K)

A : 熱伝達面積 m²

添字はそれぞれ、

f : 燃料ガス

o : 酸化剤ガス

e : 電極電解質板

s : セパレータ

f_0 : 投入燃料ガス

ef : 燃料ガス-電極電解質板間

sf : 燃料ガス-セパレータ間

を示す。

〈酸化剤ガス〉

(d)～(f)を考慮して、微小時間内 Δt における熱収支は

$$C_o \Delta \theta_o = [q_o(\theta_{oo} - \theta_o)_{(d)} + k_{eo} A(\theta_e - \theta_o)_{(e)} + k_{so} A(\theta_s - \theta_o)_{(f)}] \Delta t$$

$$C_o = P_o \rho_o S_o X, \quad q_o = P_{oo} \rho_{oo} S_o v_o$$

したがって、

$$C_o \frac{d\theta_o}{dt} = q_o(\theta_{oo} - \theta_o) + k_{eo} A(\theta_e - \theta_o) + k_{so} A(\theta_s - \theta_o) \dots \dots \dots (2)$$

C_o : 酸化剤ガス流路の熱容量 J/K

q_o : 投入燃料ガス熱容量 J/(s・K)

添字は

o_0 : 投入酸化剤ガス

を示す。

〈電極電解質板〉

(b), (e), (g)～(i)を考慮する。微小時間内 Δt の熱収支は

$$C_e \Delta \theta_e = [k_{ef} A(\theta_f - \theta_e)_{(b)} + k_{eo} A(\theta_o - \theta_e)_{(e)} + \frac{j}{2F} \Delta \text{H}_2\text{O} \cdot A_{(g)} + j \cdot V \cdot A_{(h)} + \frac{5.67 f_e}{100} \left[\left(\frac{\theta_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_e}{100} \right)^4 \right] A_{(i)}] \Delta t$$

したがって

$$C_e \frac{d\theta_e}{dt} = k_{ef}A(\theta_f - \theta_e) + k_{eo}A(\theta_o - \theta_e) + \frac{jA}{2F} \Delta H_2O + jVA + 5.67f_e \left[\left(\frac{\theta_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_e}{100} \right)^4 \right] A \quad \dots\dots\dots (3)$$

C_e : 電極電解質板の熱容量 J/K

f_e : 放射係数

j : 局所電流密度 A/m²

ΔH_2O : H₂O 1 モル当たりの生成熱 J/mol

V : 運転電圧 V

F : ファラデー定数 A・s/mol

〈セパレータ〉

(c), (f), (i) を考慮すれば,

$$C_s \Delta \theta_s = \left[\frac{k_{sf}A(\theta_f - \theta_s)}{(c)} + \frac{k_{so}A(\theta_o - \theta_s)}{(f)} + 5.67f_s \left[\left(\frac{\theta_e}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s}{100} \right)^4 \right] A \right] \Delta t$$

したがって,

$$C_s \frac{d\theta_s}{dt} = k_{sf}A(\theta_f - \theta_s) + k_{so}A(\theta_o - \theta_s) + 5.67f_s \left[\left(\frac{\theta_e}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s}{100} \right)^4 \right] A \quad \dots\dots\dots (4)$$

$C_s = P_s \rho_s S_s X$

C_s : セパレータの熱容量 J/K

を示す。

ここで、操作量 $u = q_o$, $\theta_f = x_1$, $\theta_o = x_2$, $\theta_e = x_3$, $\theta_s = x_4$ とおき、状態ベクトル, $\mathbf{x} = [\theta_f, \theta_o, \theta_e, \theta_s]$, 制御量 $y = \theta_s = x_4$ と定義する。パラメータを

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{q_f}{C_f}, \quad a_2 = \frac{k_{ef}A}{C_f}, \quad a_3 = \frac{k_{sf}A}{C_f} \\ a_4 &= \frac{k_{eo}A}{C_o}, \quad a_5 = \frac{k_{so}A}{C_o}, \quad a_6 = \frac{k_{ef}A}{C_e}, \\ a_7 &= \frac{k_{eo}A}{C_e}, \quad a_8 = \frac{j \cdot A \cdot \Delta H_2O}{2 \cdot F \cdot C_e} \\ a_9 &= \frac{j \cdot V \cdot A}{C_e}, \quad a_{10} = \frac{5.67}{100^4} \frac{f_e A}{C_e} \\ a_{11} &= \frac{k_{sf}A}{C_s}, \quad a_{12} = \frac{k_{so}A}{C_s} \\ a_{13} &= \frac{5.67}{100^4} \frac{f_s A}{C_s}, \quad b_1 = \frac{1}{C_o} \end{aligned}$$

のようにおけば式(1)～(4)は,

$$\dot{\mathbf{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -(a_1 + a_2 + a_3)x_1 + a_2x_3 + a_3x_4 + a_1\theta_{fo} \\ -(a_4 + a_5)x_2 + a_4x_3 + a_5x_4 \\ a_6x_1 + a_7x_2 - (a_6 + a_7)x_3 - a_{10}x_3^4 \\ + a_{10}x_4^4 + a_8 + a_9 \\ a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3^4 - (a_{11} + a_{12})x_4 \\ - a_{13}x_4^4 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}(\mathbf{x})}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ b_1(\theta_{oo} - x_2) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{g}(\mathbf{x})} u, \quad y = h(\mathbf{x}) = \theta_s = x_4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

のようになる。上式は放射熱による4次の非線形項、状態 x と入力 u の1次積である双線形項をも含む非線形性の強い数式モデルである。

3. 制御系の構成

ここでは、燃料電池の温度安定化を目的として、フィードバック線形化を用いた制御系を構成する。

3・1 入出力線形化法の利用 あるクラスの非線形システムに対して、微分幾何学的手法を中心とした非線形制御理論の研究が1980年代以降広範囲な発展を見せ、特に線形化問題について各種の重要な設計法が提案された⁽⁶⁾。これらは制御対象の非線形性を組織的に補償するための有効な手段として、近年注目を浴びている。本研究では、線形化手法の中でも条件の緩やかな入出力線形化手法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を用いる。この手法は座標変換と状態フィードバックにより、入出力関係のみを線形化することを目的とする。本手法で使用されるリー代数の定義については文献(6)を参照されたい。システム(5)に対してまず、座標変換を強制的に $z_1 = h(\mathbf{x}) = x_4$ とおいて時間微分すれば、

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{y} = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u) \\ &= L_f h(\mathbf{x}) + L_g h(\mathbf{x})u \\ L_g h(\mathbf{x}) &= [0, 0, 0, 1][\mathbf{g}] = 0 \\ L_f h(\mathbf{x}) &= [0, 0, 0, 1][\mathbf{f}] \\ &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3^4 \\ &\quad - (a_{11} + a_{12})x_4 - a_{13}x_4^4 \end{aligned}$$

ここでさらに、 $z_2 = L_f h(\mathbf{x})$ とおき、時間微分すると

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \dot{y} = \frac{\partial z_2}{\partial \mathbf{x}} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{\partial L_f h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u) \\ &= L_f^2 h(\mathbf{x}) + L_g L_f h(\mathbf{x})u \\ L_g L_f h(\mathbf{x}) &= [a_{11}, a_{12}, a_{13}, -(a_{11} + a_{12}) \\ &\quad - 4a_{13}x_3^3][\mathbf{g}] \\ &= a_{12}b_1(\theta_{oo} - x_2) \neq 0 \end{aligned}$$

$$L_f^2 h(\mathbf{x}) = [a_{11}, a_{12}, a_{13}, -(a_{11} + a_{12}) - 4a_{13}x_3^3][\mathbf{f}]$$

これから、出力を2回微分すると入力 u の項が表れるので相対次数[6]は $r=2$ 。したがって、座標変換と状態フィードバックはそれぞれ

$$\begin{aligned} \mathbf{z} = T(\mathbf{x}) &= [z_1, z_2] = [x_4, a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3^4 \\ &\quad - (a_{11} + a_{12})x_4 - a_{13}x_4^4], \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u &= \alpha(x) + \beta(x) \\
 &= \frac{1}{a_{12}b_1(\theta_{00} - x_2)} \left[-a_{11}\{-(a_1 + a_2 + a_3)x_1 \right. \\
 &\quad + a_2x_3 + a_3x_4 + a_1\theta_{00}\} - a_{12}\{-(a_4 + a_5)x_2 \\
 &\quad + a_4x_3 + a_5x_4\} - a_{13}\{a_6x_1 + a_7x_2 \\
 &\quad - (a_6 + a_7)x_3 - a_{10}x_3^4 + a_{10}x_4^4 + a_8 + a_9\} \\
 &\quad + \{(a_{11} + a_{12}) - 4a_{13}x_3^3\}\{a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \\
 &\quad + a_{13}x_3^4 - (a_{11} + a_{12})x_4 - a_{13}x_4^4\} + v \Big] \\
 &\dots\dots\dots (7)
 \end{aligned}$$

ここで、式(7)は $\dot{z}_2$ の式を v とおいて u について解いたものである。式(6)、(7)を用いれば、式(5)の入出力関係は、

$$\dot{z} = Az + bv \dots\dots\dots (8)$$

$$y = c^T z \dots\dots\dots (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad c^T = [1, 0]$$

に変換される。制御系設計は二次元線形システム(状態 z)に対して行われる。

3・2 出力フィードバック制御系の構成 まず、システム式(8)、(9)に対して、任意の線形特性をもたせるため線形状態フィードバック

$$v = v_c - k^T z, \quad k^T = [k_1, k_2] \dots\dots\dots (10)$$

を付加して極配置する。さらに出力フィードバックループを付加して目標値と比較し、積分動作を用いるとする。

$$v_c = \frac{1}{T_I} \int (R - y) dt, \quad R: \text{目標値} \dots\dots\dots (11)$$

式(8)～(11)より、閉ループ系の伝達関数は次式のようになる。

$$G(s) = \frac{s}{s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + \frac{1}{T_I}} \dots\dots\dots (12)$$

全体の制御系のブロック線図を図2に示す。

4. シミュレーション

シミュレーションの対象となる単セル電池の仕様は、縦と横 1×1 m であり、シミュレーション条件として、

- ・燃料ガスは一定流量 流速
- ・燃料ガス組成 $H_2/CO_2/H_2O/CO$
 $= 52.61/5.46/30.25/1.43/10.25$
- ・燃料ガス利用率 80%
- ・酸化剤ガス組成 $O_2/CO_2/N_2 = 15/30/55$
- ・酸化剤ガス利用率 20%

とし、負荷(電流密度)が零の状態では電池内の燃料ガス、酸化剤ガス、電極電解質板、セパレータの温度はすべて 600°C で均一としておく。

極配置は、システム式(8)と積分器式(11)で三極となる閉ループ極を

$$\{-0.001, -0.0005 \pm 0.00087j\}$$

のバタワースパターンに配置した。その結果、制御器パラメータは

$$k_1 = 8.8 \times 10^{-6}, \quad k_2 = 0.0065, \quad T_I = 3.1 \times 10^8$$

となった。

4・1 負荷変動特性 本制御方式による燃料電池の負荷変動に対する影響を調べる。定常状態では、負荷が $1500 [\text{A}/\text{m}^2]$ であるとき、各部の定常温度が次のようであったとする。

Fig. 2 Block diagram

Fig. 3 Temperature behavior

Fig. 4 Separator temperature

$$x = \{923, 918, 973, 963\}^T \text{ (K)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

この定常状態から負荷+20%変動させたときの各部の温度挙動を図3に示す。出力であるセパレータ温度をはじめその他の温度も安定化されていることがわかる。

4・2 動作点変動特性 非線形システムに対しては、ある動作点近傍にて近似線形化して制御系を設計することが多いが、設計時の動作点とは別の動作点でシステムを運転させると動特性が設計時とは異なるため、そのたびに制御器パラメータを再調整しなければ制御性能が劣化するという問題点があった。著者らは先にフィードバック線形化法を用いれば、制御対象の動作点変動による特性変化を良好に補償できることを

示した⁽⁸⁾。本研究では次の三つの負荷状態の異なる場合を考えた。

- (1) $x = \{923, 918, 973, 963\}^T \text{ (K)}$
負荷 1 500 [A/m²] 時(基準点)
- (2) $x = \{899, 896, 924, 919\}^T \text{ (K)}$
負荷 750 [A/m²] 時
- (3) $x = \{971, 962, 1 067, 1 052\}^T \text{ (K)}$
負荷 2 250 [A/m²] 時

目標値は各動作点の $x_4 + 10 \text{ (K)}$ として与え、出力であるセパレータ温度の時間応答を図4に示す。図4から、基準点で設計した制御器パラメータを固定し、動作点を2, 3と変動させても、全動作点でまったく同一の良好な応答が得られていることがわかる。

5. 結 論

溶融炭酸塩形燃料電池の動的なモデリングに基づき、フィードバック線形化手法を用いて制御系を構成した。その結果、負荷の急激な変動に対しても、電池内の温度安定化が達成されること、負荷変動による特性変化を補償できることが示された。

今後はより複雑なモデルに対する検討や負荷変動などの影響をより良好に補償するための制御系の構成について、検討を進める予定である。

最後に本研究にあたってデータなどの御提供を始め、種々の御便宜をいただいた電力中央研究所横須賀

研究所の燃料電池研究室長 阿部俊夫氏に深く御礼申し上げます。

文 献

- (1) Blomen, L. J. M. J. and Mugerwa, M. N., (eds.), *Fuel Cell Systems*, (1993), Plenum Press.
- (2) 燃料電池発電システム編集委員会編, 燃料電池発電システム, (1993), オーム社.
- (3) 曹・増淵, 溶融炭酸塩形燃料電池の動的モデリングと動的応答, 機論, 57-535, B(1991), 837-842.
- (4) 吉田・増淵, 溶融炭酸塩型燃料電池の動的構造と制御問題, 計測自動制御学会第1回制御理論論議応用シンポジウム, (1993-4), 61-64.
- (5) 渡辺・幸田・麦倉・伊崎・森塚・阿部, 溶融炭酸塩型燃料電池スタック動特性解析手法の開発—(その1)単セル非定常モデルの開発—:電力中央研究所研究報告, W 90028(1991).
- (6) Isidori, A., *Nonlinear Control System, An Introduction, 2nd edition*, (1989), Springer-Verlag.
- (7) Kravaris, C. and Chung, C. B., Nonlinear state feedback synthesis by global input/output linearization, *AIChE J.*, 33-4(1987), 592-603.
- (8) Fukuzawa, M., Ohtani, T. and Masubuchi, M., A Compensating Method for the Effects of the Change of Operating State in Bilinear Systems by State Space Linearization Technique, *Proceedings of IFAC Symp. on Design Methods of Control Systems, Zurich, Switzerland*, (1991), 371-376.