

家庭用燃料電池の出力応答特性*

小原伸哉*¹, 工藤一彦*²

Output Response Characteristics of a Small-scale Fuel Cell for House

Shin'ya OBARA*³ and Kazuhiko KUDO*³ Department of Mechanical Engineering, Tomakomai National College of Technology,
443 Nishikioka, Tomakomai-shi, Hokkaido, 059-1275 Japan

The transfer function for heat output of each component which constitutes a solid-polymer-membrane-type fuel cell was determined from transient response characteristics. All the transfer functions were expressed with time lag of first order, and the transient response characteristics of whole-system heat output was investigated using these transfer functions. As a result, the response characteristic for follow-up of electric power load is good. However, the exhaust heat output of a fuel cell and a reformer has dramatically slow response speed. In order to maintain the high efficiency of the system, the device about the heat recovery by thermal storage and utilization by a time shift is required. Since the speed of response of the heat of a system is slow, exhaust heat recovery reaches at midnight. From analysis results, although the response characteristics are good about follow of electric power load, the exhaust heat output of a fuel cell and a reformer is considered to be what has very slow speed of response.

Key Words: Fuel Cell, Transient Response, Energy Saving, Power Plant

1. 緒 言

固体高分子膜形燃料電池(以後 PEFC と称する)を住宅などに設置してコジェネレーション(以後 CGS と称する)として利用する場合の運用計画については、混合整数計画法や遺伝的アルゴリズムの考え方を導入する解析方法が知られている⁽¹⁾⁽²⁾。PEFC-CGS を負荷変動の大きな住宅に設置して運用することを考えると、システムの電力及び熱出力のそれぞれに関する過渡応答特性を考慮する必要がある。これまでに、PEFC のセルスタックで発生する熱を回収して、これをラジエータから出力する際の応答特性の調査が Zhang Y.ら⁽³⁾によって行われている。この調査では、電力の負荷や、セルスタックで発生する熱を回収するための熱媒体流量の変化をステップ入力する際の、システムの熱出力に関する応答特性について

検討している。一方、著者らはこれまでに改質器、PEFC、インバータ、系統連係器などで構成する家庭用の1kW電力出力システムの電力に関する過渡応答特性の調査を行っている⁽⁴⁾。この報告で、PEFC、改質器、インバータ、系統連係器の時定数と、システムから出力する電力が、需要量に追従するようにフィードバック制御を行う際の、PI制御のパラメータの設定値が、電力の出力特性に及ぼす影響を明らかとした。また、これまでに実施されている、PEFC-CGSの電力出力に関する過渡応答特性の試験調査の報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾から推察すると、PEFCの応答速度は、一般家庭で使用する家電品の使用に十分であるものと考えられる。一方、改質器を含むPEFC-CGSについて、電力出力と同時に熱の出力応答を考慮した報告は、これまでのところ見当たらない。そこで本稿では、電力負荷が変動する際のPEFC及び改質器での過渡応答特性と、これに伴って出力するPEFC及び改質器での排熱の過渡応答特性、さらに、補助熱源として使用するヒートポンプの熱出力に関する過渡応答特性を考

* 原稿受付 2005年2月2日。

*¹ 正員、苫小牧工業高等専門学校機械工学科(☎059-1275 苫小牧市字錦岡443)。*² 正員、フェロー、北海道大学大学院工学研究科(☎060-8628 札幌市北区北13条西8)。

E-mail: shinya@me.tomakomai-ct.ac.jp

慮した、家庭用燃料電池システムの出力応答特性の調査を行う。システムを構成する各要素の伝達関数については、試験などで得た過渡応答特性の近似曲線から推察して一次遅れ系で表す。さらに、これらの伝達関数を用いてシステムを構成する際の、システム全体での応答特性を調査する。解析事例として、本稿で取り上げた PEFC-CGS を、札幌市の戸建住宅でのエネルギー需要パターンの下で運転する際の、システムの電力及び熱出力の過渡応答特性について調査を行う。

2. おもな記号

a	: 一次遅れ系伝達関数の時定数	s
b	: 一次遅れ系伝達関数の定数部	
E	: 電力	kW
ΔE	: 電力消費	kW
H	: 熱	kW
ΔH	: 熱の消費	kW
ΔH_{298}°	: 標準反応熱	kJ/mol
I	: 比例積分制御での積分項のパラメータ	
P	: 比例積分制御での比例項のパラメータ	
Q	: 流量	g/s
t	: サンプル時刻	s

添字

bwb	: 改質器熱源バーナー用のブロウ
bwd	: ドライヤに空気を供給するブロウ
bwf	: 燃料電池に空気を供給するブロウ
cb	: 改質器のヒーター
cm	: 商用電力
f	: 燃料電池
h	: ヒートポンプ
iv	: インバータ
mt	: ヒートポンプの電動機
$need$: エネルギー需要
$pp1$: 燃料電池排熱回収用の循環ポンプ
$pp2$: 土壌熱源ヒートポンプの循環ポンプ
ra	: ラジエータ
rm	: 改質器
s	: システム
sys	: システム

3. 想定する燃料電池システム

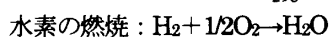
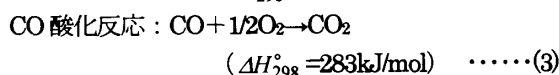
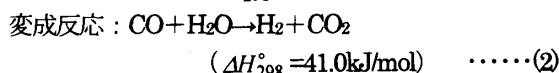
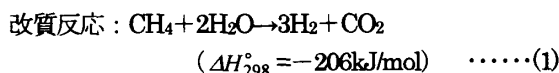
3.1 システムの入出力と運転方法 本稿で扱う PEFC-CGS のモデルを図 1 に示す。また、想定するシステムの仕様の概要を表 1 に示す。システムは、都市ガス改質器、PEFC、ドライヤ、DC/AC 変換器を含むインバータ、ヒートポンプシステム、ラジエータ

で構成する。次節で述べるように、システムには改質ガスに変換するための都市ガスを、流量バルブ VA1 を制御して $Q_{m,t}$ (t はサンプリング時刻) で供給するが、この他に改質器の温度を維持するための熱源とする、加熱バーナー用の都市ガスを流量 $Q_{cb,t}$ で供給する。システムからの電力出力は、燃料電池と商用電力の 2 系統を連係して行う。システムの電力出力については、負荷に追従するような運転制御を加えるものとする。したがって、燃料電池排熱及び改質器内に設置した改質器の熱源用バーナーの排熱については、電力負荷に依存して出力することとなる。システムの熱出力については、上で述べた 2 つの排熱が熱負荷に対して不足する場合に、不足分をヒートポンプの運転で賄うものとする。

3.2 各系統の動作

(1) 改質ガス系統

改質器での、都市ガスの水蒸気改質 (式(1)) による水素生成は、系統 1 から流量 $Q_{m,t}$ で都市ガスを改質器に供給して行う。また、系統 2 により流量 $Q_{cb,t}$ の都市ガスを改質器中のバーナーに供給して、この際に生成する燃焼ガスの熱量中から式(1)の反応に要する熱を得る。改質ガス中には、式(1)の反応が未完全であることから生じる CO が含まれるが、CO は PEFC の電極を被毒し、この結果、電力出力は大幅に低下することとなる。そこで、改質ガス中の CO 濃度を低減するために、変成反応 (式(2)) を行う変成部を改質器中に設ける。さらに CO 濃度を 10ppm 程度に低減するために、CO の酸化反応 (式(3)) を行う CO 酸化部を設ける。ただし、変成部から出てくる改質ガス中には多くの水分を含んでいることから、改質ガスを大気で冷却して水分を除くドライヤを設ける。CO 酸化部では、改質ガス中の一部の水素が式(4)で示す燃焼反応により燃焼する。式(3)と式(4)による反応の選択性は、反応場の温度に依存することから、水素の燃焼を低減するためには CO 酸化部の温度管理が必要となる。5章の解析事例では、PEFC に供給する改質ガス中の CO 濃度は、10ppm 以下に抑えられているものとする。また、CO 酸化部での水素燃焼量については、わずかな量であるものとして考慮しない。



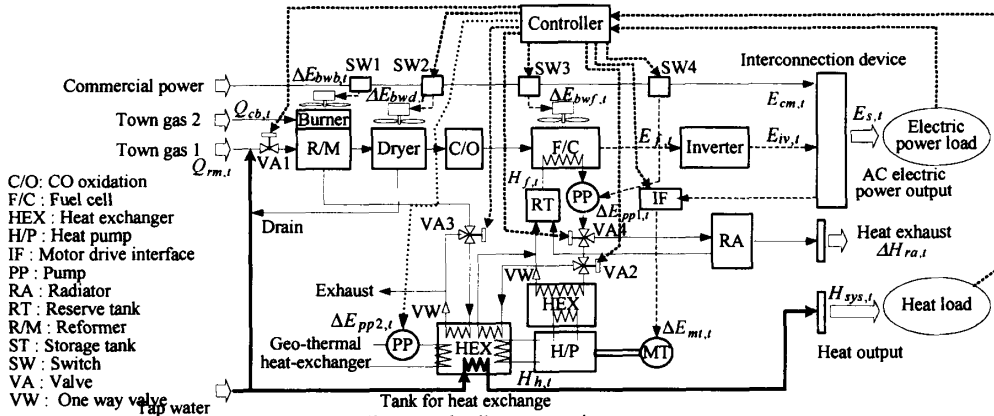


Fig. 1 Fuel cell co-generation system

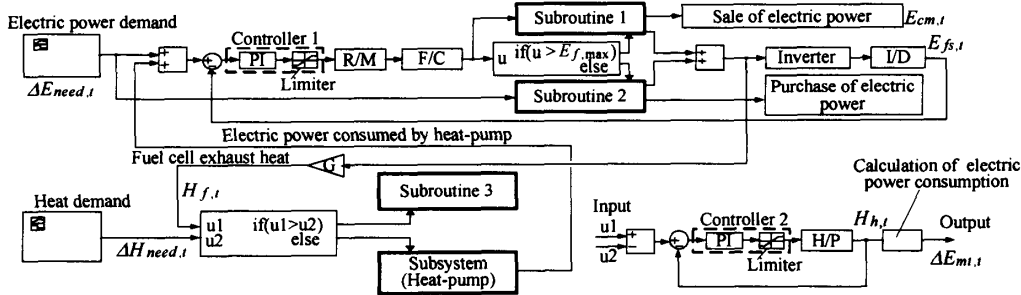


Fig. 2 System block diagram

Fig. 3 Subsystem

$$(\Delta H_{298} = 287 \text{ kJ/mol}) \dots\dots(4)$$

(2) 電力系統

改質ガスを燃料電池に供給して発電を行い、この電力を DC/AC 変換器を含むインバータに送る。インバータでは、発電した電力を交流 100V の既定周波数に変換して、電力 $E_{iv,t}$ を系統連係器に供給する。電力については、この他に商用電力系統からも供給可能とし、システムでは、燃料電池及び商用電力の 2 つの系統から、系統連係器を介してユーザーに電力を供給する。

(3) 補機に供給する電力系統

改質器の熱源用バーナーに空気を供給するためのブロワで消費する電力 $\Delta E_{bwb,t}$ 、ドライヤに大気を供給するためのブロワで消費する電力 $\Delta E_{bwd,t}$ 、燃料電池のカソードに空気を供給するためのブロワで消費する電力 $\Delta E_{bwf,t}$ 、燃料電池排熱を系外に運び出すための熱媒体ポンプによる電力消費 $\Delta E_{pp1,t}$ については、すべて商用電力から供給して賄うこととする。さらに、ヒートポンプについては寒冷地でも使用可能な土壤熱源方式を想定する。この方式では、土壤に埋めた熱交換器から採熱するための、熱媒体循環ポンプによる電力消費 $\Delta E_{pp2,t}$ を伴うが、これについても商用電力系統から供給して賄うこととする。

(4) 熱系統

システムから需要側には 65°C の温水で熱を供給し、この熱源としては、燃料電池排熱、改質器の熱源用バーナーの排熱、ヒートポンプで生成する熱を用いる。

これらの熱源と水道水が、熱媒体の入ったタンク内で熱交換することで、システムから温水を出力することができる。ただし解析では、簡単のためタンク内の熱交換器と熱媒体の間の熱応答特性は考慮せず、熱収支だけを扱う。熱源は熱需要の大きさにより、①燃料電池排熱と改質器の熱源用バーナーの排熱、②ヒートポンプで生成する熱 (①を低熱源とする)、から選択することができる。これらの選択は、図 1 中に示す開閉バルブ VA2 と VA3、入切りスイッチ SW4、及びヒートポンプの駆動用モーターへの電力消費 $\Delta E_{mt,t}$ を制御して行う。また、燃料電池本体の温度が 85°C を上回る際には、開閉バルブ VA4 を制御して燃料電池排熱をラジエータから放出する。ヒートポンプを駆動するための電力消費 $\Delta E_{mt,t}$ については商用電力から供給する。

3.3 制御ブロック図 図 2 は、図 1 のシステムの制御ブロック図である。図 2 中の Subroutine 1 と Subroutine 2 は、それぞれ売電を行う際の電力量に関するサブルーチンと、買電の量を計算するためのサブルーチンである。また、Subroutine 3 と Subsystem は、燃料電池排熱が熱需要に比べて足りないときの動作に関するもので、それぞれヒートポンプの運転を行わない場合 (3.2 節(4)中の①) のサブルーチンと、行う場合 (3.2 節(4)中の②) のサブシステムを表す。このうちの Subsystem の詳細を図 3 に示す。図 2 中の Controller 1 と図 3 中の Controller 2 は、それぞれシステムの電力出力及びヒートポンプの

Table 1 System specifications

Fuel cell	
Proton Exchange Membrane Fuel Cell	
Maximum power	1.1 kW
Reformer	
Maximum generated quantity of hydrogen	0.005 mol/s
Efficiency of reformer	70 %
Coefficient of reforming gas utilization	83 %
Heat-pump	
Type	Geo-thermal heat-pump
Refrigerant	R-134a
Maximum output of heat	7.0 kW
Maximum COP	4.0
Inverter with interconnection device	
Inverter efficiency	95 %

Table 2 Transfer function of an electric power output.

Device unit	Transfer function of first-order
Fuel cell stack	Input $\rightarrow \frac{1}{0.26s+1} \rightarrow$ Output
Reformer ⁽⁸⁾	Input (Fuel) $\rightarrow \frac{1}{1.3s+1} \rightarrow$ Output (Reformed gas)
Inverter with DC-AC converter ⁽⁹⁾	Input $\rightarrow \frac{1}{0.04s+1} \rightarrow$ Output
Interconnection device ^{(9),(10)}	Input $\rightarrow \frac{1}{0.004s+1} \rightarrow$ Output

Table 3 Transfer function of a heat output.

Device unit	Transfer function of first-order
Heat pump	Input $\rightarrow \frac{1}{33.3s+1} \rightarrow$ Output
Fuel cell stack	Input $\rightarrow \frac{b}{as+1} \rightarrow$ Output
Burner exhaust heat installed in the reformer	Input $\rightarrow \frac{0.37}{150s+1} \rightarrow$ Output

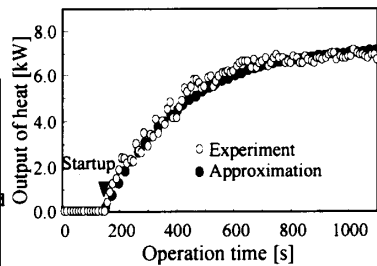


Fig. 4 Average temperature of the heat medium inside the tank which carries out heat exchange to the condenser⁽¹¹⁾.

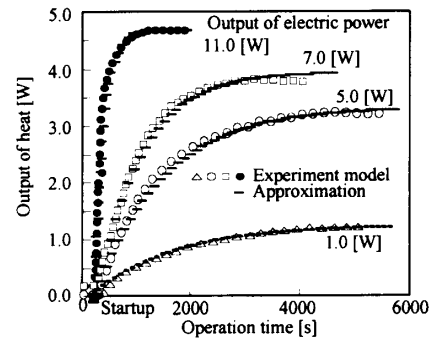


Fig. 5 The model of air exhaust-gas temperature of the fuel cell stack at the time of changing a load⁽⁷⁾.

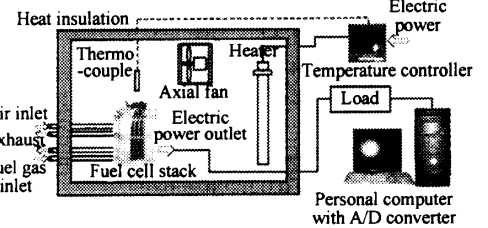


Fig. 6 Fuel cell stack test system.

熱出力を制御する制御器である。各コントローラには、予め比例積分制御（以下、PI 制御と称す）の制御パラメータを与えておき、電力及び熱負荷とシステムでの各出力の差をなくすようにフィードバック制御を行う。本稿では微分制御については用いないこととした。この理由は、微分制御を加えることで大きな行き過ぎ量を生じることがあり、この場合には燃料電池やヒートポンプの出力を上げて対応することとなり、機器容量をこれに合わせる必要があるからである。また、各コントローラにはリミッタを設けており、燃料電池及びヒートポンプの出力が容量範囲内で制御されるように制約している。

3・4 電力及び熱出力の制御 電力需要を $\Delta E_{need,t}$ として、燃料電池システムのインバータ出口での電力出力を $E_{iv,t}$ とすると、負荷追従による運転モードでは、 $\Delta E_{need,t}$ と $E_{iv,t-1}$ の偏差が小さくなるように、Controller 1 では改質器に供給する燃料量を制御する。一方、燃料電池で発電した電力を、商用電力システムに連係して売電する場合には、燃料電池を常時最大出力で運転することとなり、システムでの最大電力出力と $\Delta E_{need,t}$ の差が売電の対象となる。ヒートポンプの運転に関する Controller 2 による制御では、熱需要を $\Delta H_{need,t}$ とし、システムの熱出力を $H_{sys,t}$ とすると、 $\Delta H_{need,t}$ と $H_{sys,t-1}$ の差を小さくするように、ヒートポンプ駆動用モーターの電力消費 $\Delta E_{m,t}$ を制御して熱 ($H_{h,t}$) を出力する。

4 システム構成機器の過渡応答特性

4・1 各機器の電力出力に関する時定数 燃料電池、改質器、インバータ、系統連系器のそれぞれの機器の、

電力に関する過渡応答特性を一次遅れ系で表すこととする。各機器の時定数については、表 2 中に示す値とするが、これらの値の決定方法については前報⁽⁴⁾で述べている。改質器の改質ガス生成量と排熱出力の応答特性の間には、強い関係があるが、表 2 と表 3 中の応答特性はこの関係を含んだ結果から決めている⁽⁸⁾。

4・2 各機器の熱出力に関する時定数 ヒートポンプの熱出力、燃料電池排熱及び改質器の熱源用バーナーの排熱に関する過渡応答特性についても、本稿では一次遅れ系で表すこととする。各機器の時定数は、表 3 中に示す値としたが、これらの決定手順を以下に述べる。

(a) ヒートポンプの時定数

土壌熱源ヒートポンプの熱出力特性の実験結果⁽¹¹⁾を参考にして、無負荷状態から瞬時に最大出力で運転するようにステップ入力するときの、過渡応答特性の結果を図 4 中の白抜き丸 (○) で示す。この実験結果は、凝縮器を水槽内に設置して、水槽の水温の変化からヒートポンプでの熱出力量を計算したものである。一方、図 4 中の黒丸 (●) は、上で述べたヒートポンプの熱出力時の過渡応答特性を近似するプロットである。黒丸のデータに関する近似曲線を描くようにして、表 3 中に示したヒートポンプでの伝達関数を作成した。

(b) 燃料電池セルスタックの時定数

燃料電池セルスタックでの熱出力については、カソードから排気する空気のエンタルピ輸送から見積もる。図 5 は、図 6 の試験装置による燃料電池セルスタックの電力及び熱出力の実験結果と、文献⁽⁶⁾を参考に

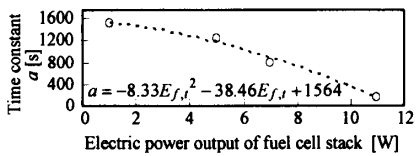


Fig. 7 The approximate equation about the time constant of the transfer function.

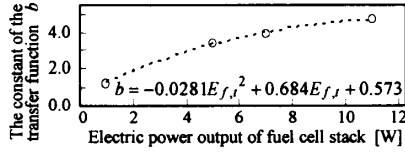


Fig. 8 The approximate equation about the constant of the transfer function.

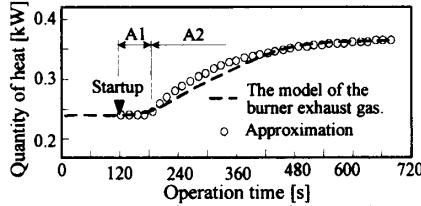


Fig. 9 The model of the burner exhaust gas heat at the time of a load going up from 50% to 100%⁽¹²⁾. The reformed gas heat to output is 1.2kW at the maximum.

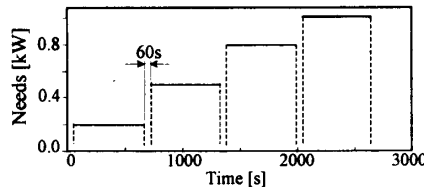
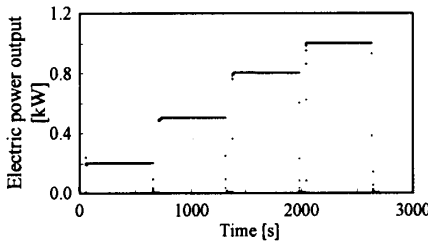
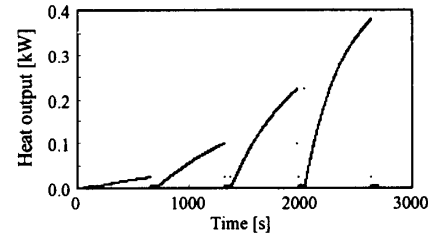


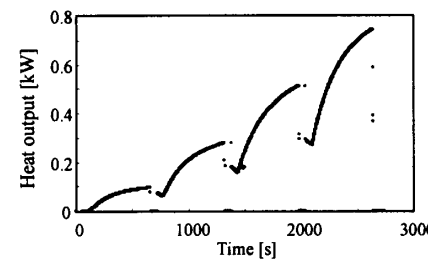
Fig. 10 Step input of electric power needs for PEFC-CGS.



(a) Electric power output of the fuel cell stack



(b) Heat output of the fuel cell stack



(c) Heat output of the fuel cell stack and the reformer

Fig. 11 Electric power and heat output of fuel cell stack with/without the reformer. Parameter of the system controller are $P_f=12.0, J_f=1.0$.

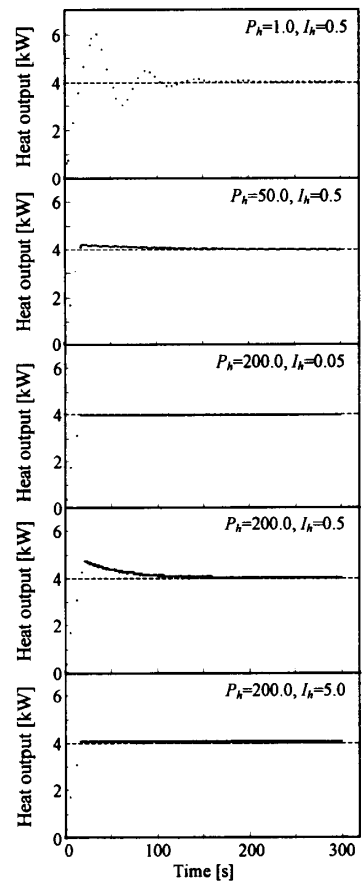


Fig. 12 Heat output of the geo-thermal heat pump system.

して作成した燃料電池セルスタックの熱出力に関する過渡応答特性モデルである。図 6 の試験装置では、断熱材で囲まれた箱内に設置した燃料電池セルスタックの初期動作温度を自由に設定することができる。この装置による試験の結果から、燃料電池の発電効率は動作温度に依存するものと考えられ、動作温度を 288K (15°C) から 358K (85°C) まで変化させて試験を行うと、発電効率はおよそ 30%の差を生じる。本稿では、このような、燃料電池の動作温度と出力特性の依存性については考慮しないこととする。

燃料電池セルスタックの熱出力に関する過渡応答特性は、図 5 に示すように発電量に大きく依存する。そこで本稿では、図 5 中に示すように、発電量ごとに近似曲線を求めて各伝達関数を作成し、表 3 中に示す伝達関数の時定数 a と定数 b については、図 7 及び図 8 に示すように、燃料電池の発電量との関係で整理した。したがって、燃料電池の電力出力量が決まると、この値を、図 7 及び図 8 中の近似式に与えることで、表 3 中に示した燃料電池セルスタックでの熱出力に関する伝達関数が決まる。

(c) 改質器熱源用バーナーの排熱の時定数

図 9 中の破線は、改質器の負荷を 50% から 100% としたときの、改質器内に設置した熱源バーナーの排

熱に関する過渡応答特性のモデルである⁽¹²⁾。図に示すように、改質器内に設置した熱源バーナーの排熱の過渡応答特性は、上で述べたヒートポンプや燃料電池セルスタックでの熱出力特性とは異なり S 字形となる。そこで、図 9 中の過渡応答特性の伝達関数については、近似曲線を図中の A1 と A2 の各領域に対して独立に作成し、それぞれ、時間遅れ及び一次遅れを表して用いることとした。表 3 中の伝達関数は、このうちの一次遅れを表すものである。

5. 解析事例

5.1 解析方法 PEFC-CGS の電力及び熱出力に関する過渡応答特性を、Math Work社の MATLAB (Ver.7.0)/Simulink (Ver.6.0)により解析を行う。使用するソルバでは陽的 Runge-Kutta 法を導入し、解析のサンプリング時間を、誤差が 0.1%以内となるように自動計算して決める

5.2 燃料電池と改質器の出力特性 図 10 に示すステップ状の電力負荷を PEFC-CGS に与えるときの、燃料電池セルスタック単体及び燃料電池セルスタックと改質器での、熱出力に関する過渡応答特性の解析結果を図 11 に示す。図 10 に示した電力の負荷

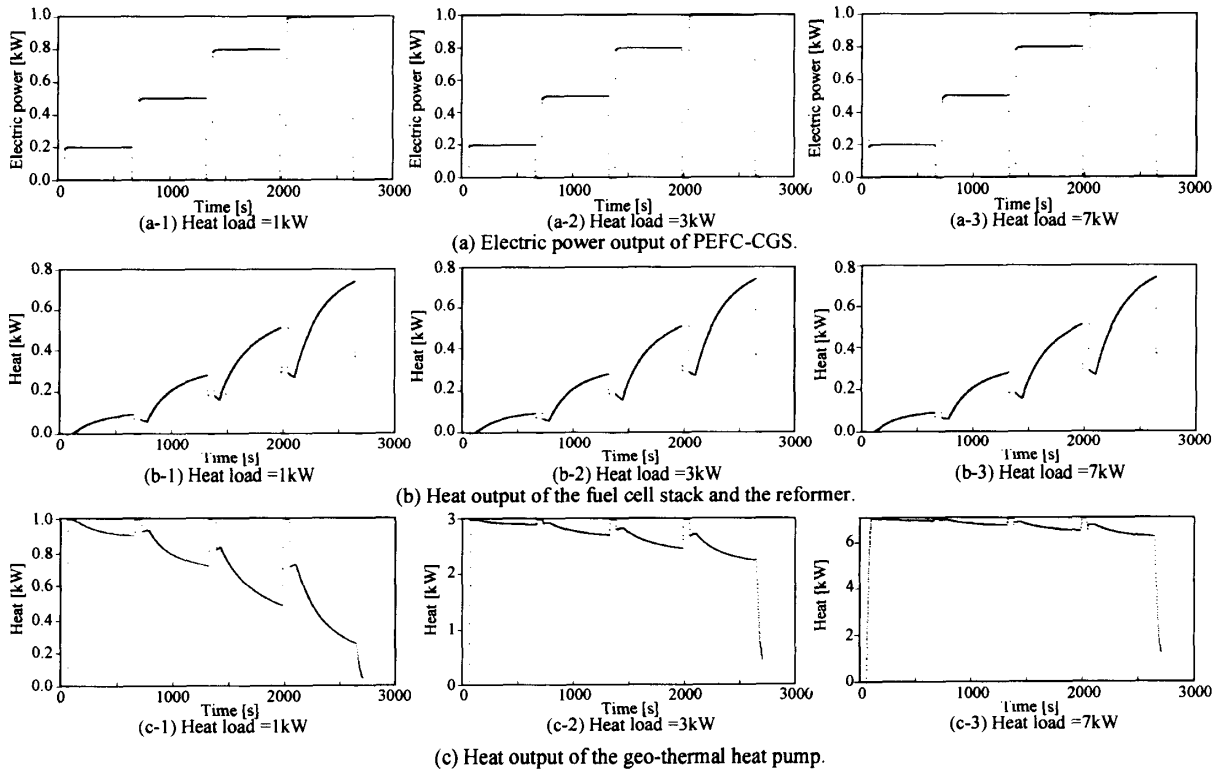


Fig. 13 Characteristics of system transient response with heat-pump PI controller. $P_f=12.0$, $I_f=1.0$, $P_h=120.0$, $I_h=5.0$.

パターンは、ステップ状の各負荷入力を加える前に 60 秒の無負荷状態のインターバルを設けている。図 11(a)は、燃料電池セルスタックの電力出力に関する解析結果で、図 11(b)は、燃料電池セルスタックでの熱出力に関する解析結果である。また、図 11(c)は、燃料電池セルスタックの排熱と改質器の熱源用バーナーの排熱を加算した、熱出力に関する過渡応答特性の解析結果である。前報⁽⁴⁾で述べたように、最大電力 1kW を出力する際の燃料電池セルスタックでの整定時間はおよそ 3 秒である。これに対して燃料電池セルスタックでの熱出力については、図 5 で示したように、時定数は電力出力に関するものと比べて大きいことから、図 11(b)に示すように、熱出力が安定するまでには長い時間を要する。燃料電池セルスタックの排熱と、改質器の熱源用バーナーの排熱を加算した際の、図 11(c)に示す過渡応答特性の解析結果から、電力出力が大きくなるにつれて熱出力の立ち上がり時間は短くなるのがわかる。また、4.2 節の(c)項で述べたように、改質器の熱源用バーナーの排熱出力については時間遅れを考慮していることから、図 11(c)中の各熱出力の直後には一旦下降する傾向を示す。したがって、負荷変動が激しい住宅で PEFC-CGS を運転すると、図 11 で示したように、電力の応答特性に対して熱の応答特性は鈍いことから、需要側への熱供給は、電力供給のタイミングに比べて遅くしかも長い時間を要することとなる。熱電比が小さく、ヒートポンプな

どの補助熱源を用いないシステムを導入する場合には、蓄熱による排熱回収と時間シフトによる需要側への熱供給を行わないと、熱の供給不足が生じるものと考えられる。

5.3 ヒートポンプの PI 制御パラメータ 図 12 は、図 3 で示したヒートポンプの制御器 (図中の Controller 2) 内で設定する、PI 制御パラメータを変化させたときの、ヒートポンプでの熱出力に関する過渡応答の解析結果である。図 12 中に示す、制御パラメータの違いによる各過渡応答特性の解析結果を比較すると、整定時間、行き過ぎ量、定常誤差が最も良いものは、 $P_h=200.0$, $I_h=0.05$ の結果である。そこで以下の解析では、ヒートポンプの制御器の制御パラメータを $P_h=200.0$, $I_h=0.05$ として解析を行う。

5.4 PEFC-CGS の応答特性 図 13 は、PEFC-CGS に図 10 で示した電力負荷と、1kW, 3kW, 7kW の熱負荷を加えたときの、(a)PEFC-CGS での電力出力 ($E_{iv,t}$)、(b)セルスタックと改質器の熱源用バーナーでの排熱出力、(c)ヒートポンプでの熱出力 ($H_{h,t}$) についての解析結果である。熱負荷については、60 秒の無負荷状態のインターバルを設けた後に、負荷の各値をステップ入力している。図 13(a)に示す、各熱負荷の下での PEFC-CGS の電力出力に関する過渡応答特性は、整定時間、行き過ぎ量、定常誤差について良好であった⁽⁴⁾。これに対して図 13(b)に示す、燃料電池セルスタックと改質器の熱源

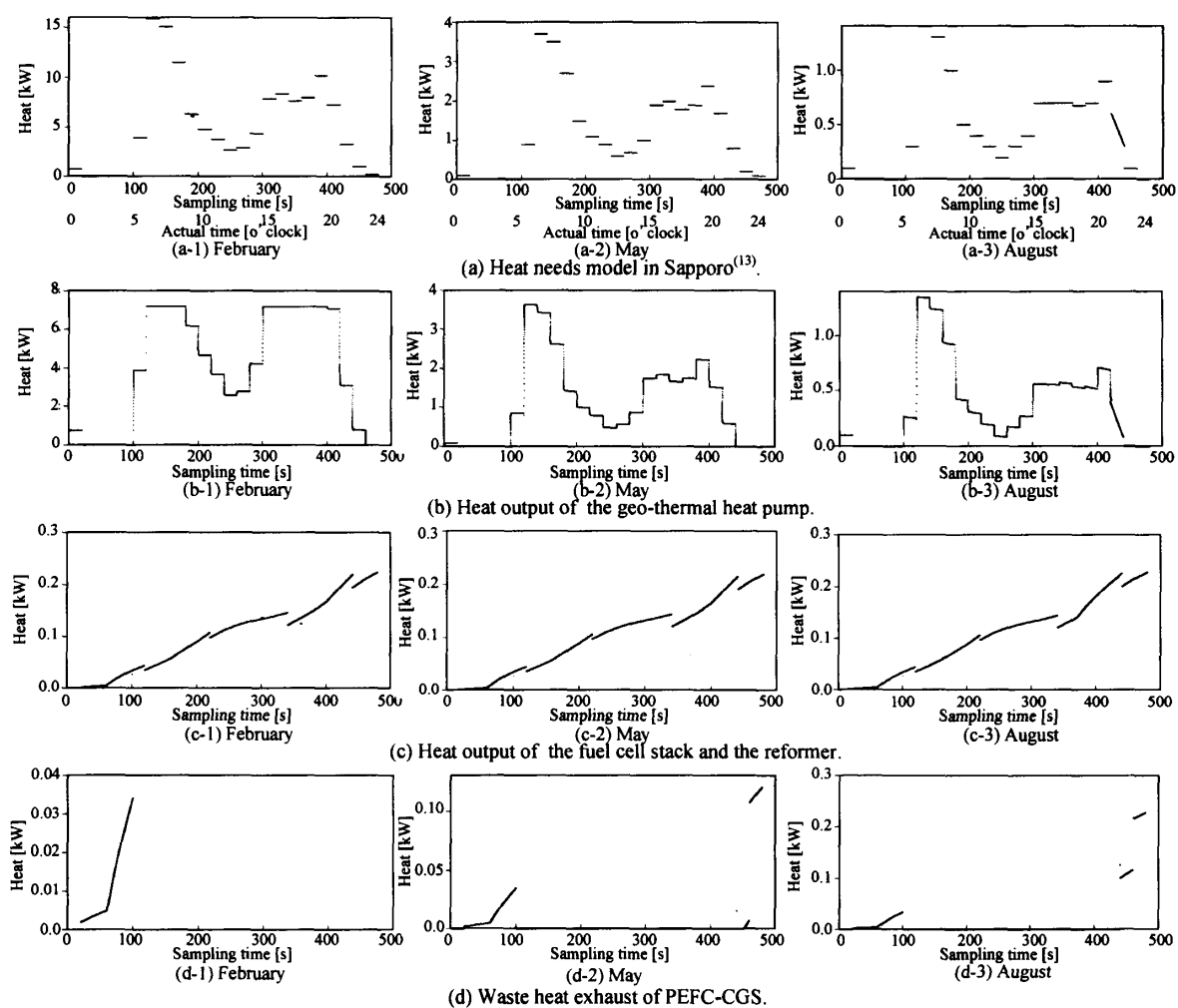


Fig. 14 Calculation results of heat system in Sapporo.

用バーナーでの排熱出力は応答が遅い。このため、図 13(c)に示すヒートポンプの熱出力は、両排熱出力だけでは熱負荷に対して不足する際に、この不足分を補うように運転することとなる。このことから、システムの熱出力を熱負荷に精度良く追従させるためには、補助熱源に利用する熱機器の容量制御が、両排熱の時間変化に迅速に対応できる必要がある。

ヒートポンプの制御器を設ける場合と設けない場合での、熱出力量の差は、例えば図 13(c-3)の全サンプリング時刻での熱出力を加算した値を比較すると、おおよそ 1 割以下である。この際の、ヒートポンプの制御器を設けない運転とは、表 3 中に示す時定数による熱出力であるとする。一方、ヒートポンプに制御器を設けた場合の熱出力の応答速度は、制御器を設けない場合と比べて大幅に改善される。

5.5 札幌市の戸建て住宅への導入 図 14 と図 15 は、それぞれ、札幌市の平均的な戸建て住宅の負荷パターン⁽¹³⁾の下で PEFC-CGS を導入する際の、システムでの熱出力と電力出力に関する解析結果である。ただし、図 14 と図 15 中の、全ての図の横軸は

解析でのサンプリング時間を示しているが、図 14(a)の横軸に示すような、実時間による解析を行うと計算時間が莫大に長くなることから、本稿では実時間を 1/180 に短縮して解析を行う。札幌市の冬期 (2 月)、中間期 (5 月)、夏期 (8 月) の、代表時刻での戸建て住宅の熱及び電力負荷パターンのモデルを、図 14(a)と図 15(a)に示す。熱負荷パターンには給湯及び浴槽用の熱負荷も含んでいるが、本稿で想定する PEFC-CGS の補助熱源用ヒートポンプの最大出力は、表 1 で示したように 7kW である。図 14(a)の熱負荷パターンの中で 7kW を越えるものについては、給湯・浴槽用に設けた別熱源で対応することとする。図 14(b)は、ヒートポンプの熱出力に関する解析結果である。この結果から、ヒートポンプの熱出力に関する応答速度は速いことから、熱負荷の追従には問題が無いものとする。図 14(c)は、燃料電池セルスタックの排熱と、改質器の熱源用バーナーの排熱を足した熱出力の解析結果である。燃料電池排熱の出力と、改質器の熱源用バーナー排熱の出力については時定数が大きく、図中に示すように、このサンプリング時間内の結果で

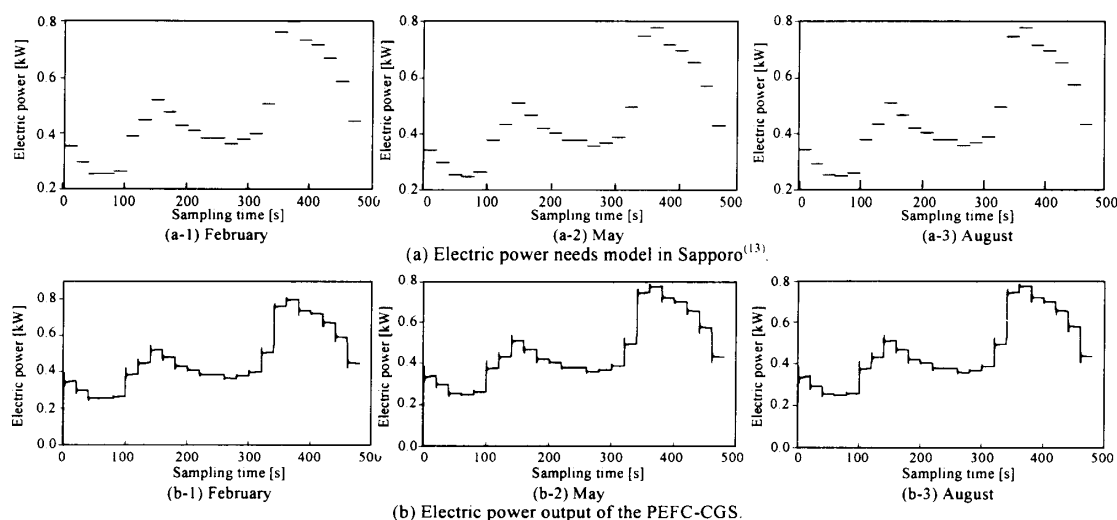


Fig. 15 Calculation results of electric power system in Sapporo.

は、時間が経過するに従って熱出力は増加し収束する傾向にない。図 14(d)は、ラジエータを介してシステムから系外に放出する熱の解析結果である。系外への熱の放出は、何れも熱需要が少ない時間帯で、発電時の熱余りが原因である。ただしこれらの熱は、蓄熱槽を設けて回収することもできる。一方、図 15(b)は、図 15(a)の電力負荷パターンに追従するように制御する、PEFC-CGS での電力出力の応答特性の解析結果である。このように、システムでの電力出力に関する応答速度は、燃料電池排熱の出力と改質器の熱源用バーナーの排熱出力に関する応答速度に比べると大変速い。以上のことから、ヒートポンプを用いず燃料電池及び改質器の排熱だけで熱需要を賄う場合には、熱応答の悪さに対策を要することとなる。特に、夕方以降のシステムでの電力出力に伴って発生する熱は、深夜までの時間をかけて回収することとなり、早朝の大きな熱需要に対応するためには、蓄熱での放熱損失がシステムの総合効率に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

6. 結 言

電力の最大出力が 1 kW 程度の固体高分子膜形燃料電池について、その構成要素の伝達関数を、過渡応答特性から推察した。伝達関数は一次遅れ系で表して、これらで構成するシステム全体での、熱出力に関する過渡応答特性の調査を行った。この結果、①電力負荷の追従については応答特性が良好であるが、燃料電池及び改質器の排熱出力については応答速度が非常に遅い、②このことから、蓄熱などによる熱回収と時間シフトによる利用を行わなくては熱不足となる時間帯があることがわかった。

本研究の一部は、平成 16 年度科学研究費補助金基盤研究(C)課題番号 15510078 の助成金を得て行われた。紙面上にて感謝の意を表する。

文 献

- (1) 伊東弘一・ほか 1 名, コージェネレーションの最適計画, (1990), pp.25-43, 産業図書.
- (2) 小原伸哉・ほか 4 名, 日本機械学会論文集, 70-692, B (2004), pp.1028-1035.
- (3) Zhang, Y., Ouyang, M., Lu, Q., Luo, J. and Li, X., *Applied Thermal Engineering*, 24 (2004), 501-513.
- (4) 小原伸哉・ほか 1 名, 過渡応答特性を考慮した小型燃料電池コジェネの導入計画(電力出力に関する応答特性), 日本機械学会論文集, 71-706, B (2005), pp.1678-1685.
- (5) Barbir, F., Fuchs, M., Husar, A. and Neutzler, J., *Society of Automotive Engineers*, SP-1505 (2000), pp.63-69.
- (6) Morner, S. O. and Klein, S. A., *ASME J. Solar Energy Engineering*, 123(2001), pp. 225-231.
- (7) 伊部聡・ほか 4 名, エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, (2002), pp. 493-796.
- (8) 水上貴彰・ほか 3 名, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集, 3(2003), 297-298.
- (9) 京都電機器株式会社, 系統連係インバータカタログ及び試験データシート, (2001).
- (10) 京都電機器株式会社, マルチ切替器カタログ, (2001).
- (11) 小原伸哉・ほか 6 名, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 36 回学術講演会論文集, (2002), pp. 141-144.
- (12) 今田典幸・ほか 6 名, 燃料電池シンポジウム講演予稿集, 9(2002), pp. 157-160.
- (13) 成田樹昭, 寒冷都市の未利用エネルギーと地域熱供給への活用に関する研究, 北海道大学大学院工学研究科衛生工学専攻博士論文, (1996), pp. 29-67.