マイクロガスタービン・固体酸化物形燃料電池
ハイブリッドシステムの部分負荷特性の評価*君島 真仁^{*1}, 笠木 伸英^{*2}Performance Evaluation of Micro Gas Turbine-Solid Oxide
Fuel Cell Hybrid System under Part-Load ConditionsShinji KIMIJIMA^{*3} and Nobuhide KASAGI^{*3} Department of Machinery and Control Systems, Shibaura Institute of Technology,
307 Fukasaku, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama, 337-8570 Japan

Design-point and part-load characteristics of a gas turbine-solid oxide fuel cell hybrid micro generation system, of which total power output is 30 kW, are investigated for its prospective use in the small distributed energy systems. A cycle analysis of the hybrid system has been performed to obtain general strategies of highly efficient operation and control. The method of analysis has been verified by comparison with previous results, of which power output was assumed in the range from 259 to 519 kW. Then, the part-load performance of the 30 kW system has been evaluated. Two typical operation modes, i.e., constant and variable rotation speed gas turbine operation, are considered. It is found that the variable speed mode is more advantageous to avoid performance degradation under part-load conditions. Operating under this mode, despite 10% adiabatic efficiency drop in the gas turbine components, the generation efficiency can be maintained over 60% (LHV) in the power output range from 40 to 100%. The turbine exhaust temperature, however, is increased with decreasing the power output under the variable speed mode with the constant SOFC operating temperature, so that the thermal durability of recuperator material becomes a critical issue. Finally, the effect of compressor/turbine operating lines on the system performance is evaluated.

Key Words: Gas Turbine, Fuel Cell, Hybrid System, Cycle Analysis, Thermal Efficiency, Part-Load Operation

1. 緒言

エネルギーの有効利用, 特に近年増加の著しい民生分野における省エネルギーに対する強い要請から, 小型分散エネルギーシステムに大きな期待が寄せられている⁽¹⁾. 分散システムでは, 需要に応じた電力と熱エネルギーの併給により, 総合的なエネルギー利用率の向上が達成されるが, エネルギーの質的側面に着目するならば, 一層の発電効率の向上が重要な技術課題となる. 現在, 分散システムの有力なコンポーネントの一つとしてマイクロガスタービン(μGT)の技術開発が推進されているが, 再生サイクルをベースとするμGTでは, 要素効率が向上しても, 40%程度の発電効率が上限値となる⁽²⁾. そこで, 一層の発電効率向上を実現する技術としてガスタービンと燃料電池(MCFC, SOFC)との複合化が提案されており⁽³⁾, 様々なシステム解析⁽⁴⁾や実プラント開発⁽⁵⁾が展開されている.

筆者らは, 各種の商業施設や事務所ビル, ホテル, 病院等におけるエネルギー供給への適用を想定した出力30kWのμGT-SOFCハイブリッドシステムを対象とし, その性能評価ならびにシステム設計の指針に関する検討を行っている⁽⁶⁾. その結果, 理想的には出力30kWで

65%(LHV)を越える発電効率が得られることを示した. しかし, このような分散電源としての利用を想定すると, エネルギー需要の変動に応じた柔軟な運転が求められ, 定格点から外れた運転条件下での性能評価が不可欠となる. ハイブリッドシステムの部分負荷特性の解析に関しては, 幾つかの報告例⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾が見られる. しかし, 部分負荷特性の詳細を考察している例は少なく, 部分負荷運転時の制御方法等に関する十分な検討例は見られない.

本論文では, 出力30kWのμGT-SOFCハイブリッドシステムを対象として, サイクル解析により部分負荷特性の予測を試みる. 運転モードとしてμGTの定速運転と変速運転とを採り上げ, 出力を40%~100%の範囲で変化させた場合のシステムの特性について考察する. 加えて, μGTの部分負荷時の作動特性がシステム全体の部分負荷特性に及ぼす影響について検討する.

記号

F	: ファラデー定数	C/mol
G	: ギブスエネルギー	J/kg
J	: 電流密度	A/m ²
K	: 平衡定数	
N	: 回転数	1/s
R	: 気体定数	J/mol K
T	: 温度	K

* 原稿受付 2003年7月10日.

^{*1} 正員, 芝浦工業大学システム工学部(☎337-8570 さいたま市見沼区大字深作307).^{*2} 正員, フェロー, 東京大学大学院工学系研究科(☎113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).

E-mail: kimi@sic.shibaura-it.ac.jp

U	: 利用率	
V	: 電圧	V
W	: 仕事率	W
ΔH	: 燃料の発熱量	J/kg
Δh	: 比エンタルピー差	J/kg
S/C	: スチーム／カーボン比	
i	: 電流	A
m	: 質量流量	kg/s
n	: 化学種のモル数	mol
p	: 圧力	Pa
u	: タービン周速	m/s
η	: 効率	
ρ	: イオン導電抵抗, 電気抵抗	Ωm

添え字

0	: 吸気条件
DP	: 設計条件
ref	: 基準条件 (288.15K, 101.325kPa)
an	: アノード反応
ca	: カソード反応
net	: 実質的な量
SOFC	: 固体酸化物形燃料電池
gt	: ガスタービン
c	: 圧縮機
t	: タービン
blow	: プロア
air	: 空気
cg	: 燃焼ガス
DA	: 直流／交流変換器
gen	: 発電機
gcfc	: SOFC 用燃料昇圧機
gcgt	: 燃焼器用燃料昇圧機

2. μ GT-SOFC ハイブリッドシステム

本研究で対象としている μ GT-SOFC ハイブリッドシステムの構成を図1⁽⁶⁾に示す。本システムは、再生ガスタービンを基本として再生器と燃焼器の間に SOFC を配置したものである。圧縮機にて吸入空気を昇圧後、再生器で予熱して SOFC のカソードに供給する。燃料には常温常圧のメタンを想定しており、水蒸気を含むアノード排気を再循環し、ここにメタンを投入し、セルの発熱を利用して改質を行う。SOFC 排気には未反応のまま排出される可燃成分が含まれることから、それを燃焼器で完全に燃焼させる。燃焼ガスは、タービンで膨張させ動力を回収した後に再生器を通過して排気される。図1中の数値は、既報⁽⁶⁾の解析結果の一例である。

3. サイクル解析

3.1 仮定事項と解析条件

本研究では、システム性能の大局的な評価を行うことを主旨としていることから、以下の仮定を設けてサイクル解析を簡略化する。

- (1) 定常運転状態を検討対象とする。
- (2) 物質の系外への漏れは無く、放熱損失は無視できる。
- (3) システム内部の全ての化学に関して反応速度は十分に大きく、平衡に達するまで進行する。
- (4) 化学反応は一定の温度、圧力、ガス組成で進行し、反応容器内部でのこれらの分布は無い。
- (5) アノード出口、カソード出口、改質器出口の温度はセルの反応温度と等しい。
- (6) 燃焼器では、SOFC 排気中の水素、一酸化炭素、メタンおよび追加投入されるメタンが完全燃焼する。
- (7) SOFC の燃料利用率は、電流密度を操作することにより部分負荷運転時にも一定に制御可能である。
- (8) 部分負荷運転時にも、改質器への流入ガス中の水蒸気とメタンのモル比 (S/C 比) を一定に維持するようなアノード排気の再循環量の操作が可能である。
- (9) 各構成要素での圧力損失は作動流体の流量に応じて変化することが予想されるが、本報では入口圧力に対する圧力損失の占める割合を圧力損失率と定義し、これを一定とする。

本研究では、主として小型分散電源を想定して、定格出力を30kWとしてサイクル解析を行っている。本報では、更に現行の μ GT の出力 (30kW ~ 100kW 程度) と整合する規模として定格出力300kWを想定した解析も行った。各々の解析条件は表1に示す通りである。30kW の場合、 μ GT の出力が6kW 程度であり (図1)、その圧縮機、タービンの断熱効率、出力10kW の μ GT の開発効⁽¹¹⁾に基づいて決定した。タービン入口温度 (TIT) は、SOFC 作動温度を超える温度 (図1の例では1150°C)

Fig. 1 Schematic diagram of μ GT-SOFC hybrid system⁽⁶⁾

となるが、セラミックス等の高耐熱性材料の適用が可能であれば、運転可能な温度レベルであると考えられる。他の条件についても、現状の技術レベルを考慮し、妥当な条件を設定している。

3.2 マイクロガスタービン

3.2.1 ガスタービン出力 ガスタービンサイクル中の圧縮ならびに膨張のプロセスにおける作動流体の状態変化の計算では、入口状態と圧力比を与え、等エントロピー変化を仮定して出口状態を求めた後に、断熱効率を用いて実際の出口状態を計算する。入口および出口の状態から、圧縮機動力 W_c 、タービン動力 W_t を計算し、補機（燃料昇圧機）の駆動に必要な動力 W_{grt} ならびに回転系の機械効率 η_{gr} 、発電機効率 η_{gen} を考慮すると正味の出力 W_{gr} が次式で計算できる。

$$W_{gr} = \eta_{gen} (\eta_{gr} W_t - W_c) - W_{grt} \quad (1)$$

3.2.2 部分負荷運転時の作動特性 ガスタービンの部分負荷運転では、回転数の操作によりサイクルの圧力比ならびに流量が変化する。この圧力比と流量の関係として、図2に示す修正流量と修正エンタルピー落差の関係⁽⁸⁾を利用する。図2中の(I)を基準とし、ガスタービンの作動特性がシステム性能に及ぼす影響を評

価するために(II)～(IV)のような特性についても解析を行っている。横軸の修正流量 m_r は次式で定義される。

$$m_r = m_c \left(P_{ref} / P \right) \sqrt{T / T_{ref}} \quad (2)$$

ここで、 P_{ref} ：基準圧力(101.325kPa)、 T_{ref} ：基準温度(288.15K)、 P ：吸気圧力、 T ：吸気温度、 m_c ：圧縮機吸気量である。縦軸の修正エンタルピー差 Δh_r は次式で定義される。

$$\Delta h_r = \Delta h / (c_{p0} T_{ref}) \quad (3)$$

ここで、 T_{ref} ：基準温度(288.15K)、 c_{p0} ：吸気温度における空気の定圧比熱、 Δh ：圧縮過程のエンタルピー差である。

また、 μ GTの回転数の変化を概算するために、まず、タービンのエンタルピー落差 Δh から次式で表される近似式によりタービン周速 u を推定する⁽¹²⁾。

$$u \approx 1.1 \sqrt{\Delta h} \quad (4)$$

回転数はタービン周速に比例することから、部分負荷運転時の回転数 N はエンタルピー落差から概算することができる (DPは設計点を表す)。

$$N / N_{DP} = \sqrt{\Delta h} / \sqrt{\Delta h_{DP}} \quad (5)$$

3.3 固体酸化物形燃料電池 燃料改質プロセスの化学反応は次の通りである。

本解析では、炭素析出反応は発生しないと仮定する。改質に必要な水蒸気量は次式で定義される S/C 比を与えることで計算され、これに応じたアノード排気の再循環量が決定される。

$$S / C = n_{\text{H}_2\text{O}} / n_{\text{CH}_4} \quad (8)$$

ここで、 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ ：アノード再循環ガス中の水蒸気モル数、 n_{CH_4} ：供給燃料モル数である。改質プロセスは吸熱反応であり、温度と圧力で決まる平衡組成と流入ガス組成

Table 1 Design-point conditions

	30kW	300kW
Cell Temperature (°C)	1000	900
Turbine Inlet Temperature (°C)	1150	1100
Pressure Ratio (-)	4.0	3.5
Recuperator Temperature Effectiveness (%)	95	85
Compressor Adiabatic Efficiency (%)	73	76
Turbine Adiabatic Efficiency (%)	80	86
GT Mechanical Efficiency (%)	95	
Blower Adiabatic Efficiency (%)	70	
Blower Mechanical Efficiency (%)	90	
Gas Compressor Adiabatic Efficiency (%)	60	
Gas Compressor Mechanical Efficiency (%)	90	
Steam Carbon Ratio (-)	4.0	3.0
Current Density (A/m ²)	3000	
H ₂ Utilization Ratio (%)	80	
Cathode Thickness (mm)	2	
Anode Thickness (mm)	0.1	
Electrolyte Thickness (mm)	0.02	
SOFC Pressure Drop (%)	5	
Reformer Pressure Drop (%)	4	
Filter Pressure Drop (%)	0.5	
Vent Pressure Drop (%)	0.5	
Recuperator Pressure Drop (Air Side) (%)	3	
Recuperator Pressure Drop (Exhaust Side) (%)	2	
Atmospheric Temperature (°C)	15	
Generator Efficiency (%)	98	
Inverter Efficiency (%)	93

Fig. 2 Operating lines on compressor map⁽⁸⁾

— 193 —

Table 2 Design-point performance

Author		Veyo et al. ⁽⁵⁾	Costamagna et al. ⁽⁷⁾	Campanari ⁽⁸⁾	Palsson and Selimovic ⁽⁹⁾	Present work
Power output kW	Total	307	287	259	519	300
	SOFC	251	241	207.8	348	220
	μ GT	67	46	53.2	171	80
Pressure ratio	Turbine	-	3.15	3.06	3.5	3.5
	Compressor	3.5	3.89	3.81	-	3.95
SOFC temperature °C		(800)	900*	990*	1100**	900
TIT °C		872	900	900	885	1100
Efficiency (LHV)		57.0	61.1	64.9	64.2	63.1

() : Estimated, * : Cell exhaust gas temperature, ** : Maximum cell temperature

(a) Power generation efficiency (LHV)

(c) Current density of SOFC

(b) Rotation speed

(d) Oxygen utilization factor in cathode of SOFC

Fig. 4 Comparison between present and previous results

解析条件を表1中の300kWに設定し、図1に示した構成の μ GT-SOFCハイブリッドシステムのサイクル解析を行った。定格点での性能ならびにサイクル各部の状態等は図3に示す通りであり、発電効率は63%(LHV)と

Table 3 Component efficiency

	(A)	(B)
Compressor adiabatic efficiency	76.0%	68.4%
Turbine adiabatic efficiency	86.0%	77.4%
Recuperator temperature effectiveness	85.0% (Design-point)	

なる。表2は定格点での性能等を他の報告例を含めて整理したものである。本解析では、定格点において μ GT出力80kW、SOFC出力220kWとなり、総出力に対して約27%が μ GTの出力となる。他者の報告では、各々のシステム構成や定格条件に差異があるため、総出力に占める μ GT出力の割合が16%～33%とばらつきがあるが、おおむね20%～30%となっていることが分かる。SOFC作動温度については、既報⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾に明確な記述がなく、表2には、筆者らの推定値 (Veyo et al.)、セル出口のガス温度 (Costamagna et al. および Campanari)、セ

ル最高温度 (Palsson and Selimovic) を示している。それらにもばらつきがあり、これが発電効率の差異に影響していると考えられる。TITについては、他者の解析では900℃程度となっているが、本解析では、SOFC後段での未反応成分の燃焼を考慮して1100℃としている。

部分負荷特性の解析では、運転モードをVSとし、圧縮機とタービンの断熱効率を表3に示すようにそれぞれ定格値とした場合(A)と10%低下させた場合(B)との二通りについて計算を行った。計算結果を図4に示す。4.1節に述べた通り、本報では断熱効率の設定が異なる二本の曲線に挟まれた領域として部分負荷特性を表している。図4(a)は発電効率を示しており、Campanari⁽⁸⁾を除いては、いずれの解析結果も負荷率の低下に伴い発電効率が低下する傾向を示していることが分かる。図4(b)はガスタービンの回転数であり、Palssonら⁽⁹⁾を除いて圧力比と流量の関係としてCampanari⁽⁸⁾と同一の特性を仮定していることから、負荷減少に対する回転数減少の割合はおおむね一致する。図4(c)および図4(d)は、それぞれ電流密度、カソードでの酸素利用率を示している。本解析での電流密度は他者の値よりも小さいが、負荷減少に対する電流密度減少の勾配はほぼ一致する。酸素利用率に関しても同様であり、いずれの解析結果においても50%～100%の負荷範囲で20%～30%の酸素利用率を示す。

比較対象とした報告例では、出力、システム構成、解析条件が各々異なることから、発電効率や負荷割合等の数値に差異が生ずるが、部分負荷特性の解析結果が示す傾向はいずれの報告も同様であると言える。従って、本解析により、図1に示すようなμGTと加圧型SOFCの複合形態を持つハイブリッドシステムの部分負荷特性の評価が可能であると考えられる。

4.3 部分負荷特性の評価 総出力30kWのμGT-SOFCハイブリッドシステムの部分負荷特性の解析結果を図5に示す。VSでは、表4の二通りの断熱効率の組み合わせを設定した。

図5(a)の通り、CSでは、圧力比ならびに空気流量がほぼ一定である。VSでは、図5(b)のように回転数を操作することになり、圧力比ならびに空気流量が低負荷ほど小さくなる。CSでは、μGTの出力が負荷に依らずほぼ一定で、SOFC側の操作により総出力を制御する(図5(c))。

部分負荷運転時の発電効率は図5(d)に示す通りである。VSで断熱効率を一定とすると、100%～65%までの範囲で負荷の低下に伴って発電効率が若干上昇する。この傾向は、SOFCの特性に依るものである。すなわち、SOFCでは負荷の低下に伴う電流減少により(14)式にて

計算される電圧が高くなるためである。図5(d)から分かるように、CSに比較してVSの方が部分負荷運転時の発電効率が高くなる。負荷減少に伴うμGTの圧縮機およびタービンの断熱効率の低下を最大10%としても、40%～75%の負荷範囲でVSの方が発電効率は高くなる。CSでは、回転数を維持するために燃焼器への投入燃料が大きくなり(図5(e))、SOFCに比して発電効率の低いμGTの出力の割合が増加することから、発電効率が低くなる。

図5(f)は、部分負荷運転時のSOFC作動温度と式(12)で定義したカソードでの酸素利用率を示したものである。VSでは、SOFC作動温度を1000℃にて一定に維持することが可能であるのに対して、CSでは負荷の減少に伴ってSOFC作動温度が低下し、60%の負荷で900℃を下回る温度となる。VSでは、SOFC出力に応じてμGT回転数により空気流量を操作することでSOFC作動温度を一定に維持することができる。CSでは、空気流量が一定となり、セル発熱に対する冷却効果が大きくなることから、SOFC動作温度が低い条件でシステムのエネルギー収支が満足される。カソードでの酸素利用率がVSに比較して低負荷ほど、より小さくなる傾向から、CSでは過剰の空気が供給されていると言える。

図5(g)はタービン出口温度(TOT)を示している。CSでは、タービンの圧力比およびTITが負荷に依らずほぼ一定であることから、TOTもおおむね一定となる。VSでは、負荷の減少に伴って圧力比が低下することから、TOTは上昇する。本システムでは、設計点でのTOTが材料の耐熱限界(ステンレス鋼で840℃程度⁽¹³⁾)に近いことから、部分負荷運転では、再生器入口温度が耐熱温度を超えることが予想され、実際には運転不能となる。SOFC作動温度を1000℃として設計されたシステムでは、部分負荷運転時にSOFC作動温度を一定に維持することができず、これを低下させなければ、安全な運転は実現されない。

図5(h)は排気ガス温度、流量を示している。前述の通り、CSでは、負荷に依らずTOTならびに空気流量が一定であることから、排気温度、流量ともにおおむね一定となる。VSでは、負荷の低下によりTOTは上昇するが、空気流量が減少するため再生器での燃焼ガスの温度降下が増加する。したがって、負荷の減少に伴っ

Table 4 Component efficiency

	(A)	(B)
Compressor adiabatic efficiency	73.0%	65.7%
Turbine adiabatic efficiency	80.0%	72.0%
Recuperator temperature effectiveness	95.0% (Design-point)

(a) Pressure ratio and air mass flow rate

(e) Fuel consumption

(b) Rotation speed

(f) SOFC operating temperature and oxygen utilization factor

(c) Power output of μ GT and SOFC

(g) Turbine outlet temperature

(d) Power generation efficiency (LHV)

(h) Exhaust gas temperature and mass flow rate

Fig. 5 Part-load characteristics of a 30kW μ GT-SOFC hybrid system

Fig. 6 Effects of μ GT operating lines (Fig.2) on part-load characteristics of a μ GT-SOFC hybrid system

て排気ガス温度が低下し、流量が減少する。CSの場合には、出力に関わらず一定量の排熱回収が可能であり、VSでは負荷減少による排熱回収量減少が予想される。

4.4 ガスタービン作動特性の影響 μ GTの特性は、主として圧縮機とタービンの各々の圧力比-流量特性から決定される作動特性の影響を受ける。これを評価するために、部分負荷運転 (VS) 時の μ GTの圧力比-流量の関係として図2に示した(I)~(IV)を適用し、部分負荷特性の解析を行った。図6に発電効率を示す。この図から分かるように、定格点からの流量の減少に対する圧力比低下の割合が大きいくほど発電効率が低くなる。この発電効率の低下は負荷が小さくなるほど顕著に現れるものの、負荷が100%~50%の範囲では、60%(LHV)を越える発電効率を維持できる。部分負荷運転時にも圧力比を下げずに運転の方が発電効率は高くなるが、実際には、圧縮機のサージングの問題から、低流量で圧力比を維持する運転は困難であり、ある程度の余裕を持った運転・制御方法の確立が必要となる。

5. 結言

本論文では、 μ GT-SOFC ハイブリッドシステムの部分負荷特性に関して、サイクル解析に基づき μ GTの定速運転と変速運転の二種類の運転モードを対象とした性能評価を行った。得られた知見を以下に要約する。

- (1) ハイブリッドシステムの部分負荷運転では、発電効率に着目すると μ GTを可変速とし、SOFC作動温度を一定に近づけて運転することが推奨される。 μ GTを定速運転とすると、 μ GTの効率低下は抑制されるが、SOFC作動温度を低下させる結果となり、変速運転よりシステム全体の発電効率が低くなる。
- (2) ハイブリッドシステムの部分負荷特性は μ GTの部分負荷特性に強く依存するが、 μ GTの変速運転が可能であれば、40%~100%の負荷範囲で、60% (LHV)を越える発電効率が期待できる。

(3) μ GTの変速運転で、SOFC作動温度を1000°Cで一定とすると、負荷減少に伴って再生器入口温度が850°Cを越える。このため、SOFC作動温度一定の変速運転を実現するためには、耐熱性に優れた再生器が必要となる。

(4) μ GTの部分負荷運転時の圧力比と流量の関係がハイブリッドシステムの性能に影響を及ぼす。発電効率の低下を抑制するには、変速運転時に流量が減少した場合にも圧力比を落とさずに運転する方が望ましいが、実際には圧縮機のサージングの問題がある。安全な運転の確保と高効率運転とを両立するような適切な制御方法の確立が求められる。

謝 辞

本論文は、科学技術振興事業団との間で戦略的基礎研究推進事業の一環として契約された「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」研究領域内の「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」研究の成果である。

参考文献

- (1) 平田賢, コージェネレーションシンポジウム 2001 (第17回) 発表抄録集 (2001), 3-18.
- (2) 笠木伸英, 高圧ガス, 38-6 (2001), 544-552.
- (3) White, D. J., ASME Paper, 99-GT-419.
- (4) Massardo, A.F. and Lubelli, F., Trans. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 122 (2000), 27-35.
- (5) Veyo, S.E., Shockling, L.A., Dederer, J.T., Gillett, J.E. and Lundberg, W.L., ASME Paper, 2000-GT-550.
- (6) 上地英之・君島真仁・笠木伸英, 日本機械学会論文集, 68-666 B (2002), 626-635.
- (7) Costamagna, P., Magistri, L. and Massardo, A.F., Journal of Power Sources, 96 (2001), 352-368.
- (8) Campanari, S., Trans. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 122 (2000), 239-246.
- (9) Palsson, J. and Selimovic, A., ASME Paper, 2001-GT-379.
- (10) Magistri, L., Massardo, A., Rodgers, C. and McDonald, C.F., ASME Paper, 2001-GT-92.
- (11) Rodgers, C., SAE Paper 740849 (1974).
- (12) Wilson, D.G. and Korakianitis, T., The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines (Second Edition), Prentice-Hall, Inc. (1998)
- (13) 堀江哲次・江田隆志, 日本ガスタービン学会誌, 27-5 (1999), 334-338.