ガスエンジン・コージェネレーション・システムの動特性分析*

伊 東 弘 一^{*1}, 横 山 良 平^{*1}
斯 波 敬^{*1}, 林 秀 和^{*2}

Analysis of Dynamic Characteristics of a Gas Engine Cogeneration System

Koichi ITO, Ryohei YOKOYAMA,
Takashi SHIBA and Hidekazu HAYASHI

Dynamic characteristics of a gas engine cogeneration system are analyzed using a simulation model. DYNAMO(dynamic model) is adopted as a simulation language because it enables an easy and flexible change of model structure and parameters. Dynamic characteristics of each piece of constituent equipment are expressed by using dead time and first-order lag elements. Their parameters are determined so that the simulation results match the measured ones accurately enough. The simulation model of the whole system is created by linking each submodel of constituent equipment. The simulation and measurement results show that the proposed modelling method is a useful tool. As an example of dynamic simulations, it is investigated how the location of measurement points influences the temperature of jacket water for cooling the gas engine.

Key Words: Systems Engineering, Simulation, Transient Response, Cogeneration, Systems Dynamics, DYNAMO

1. 緒 言

コージェネレーション・システム (CGS) は、電気と熱のエネルギー供給を同時に行う多入力・多出力システムである。電気供給に関しては、周波数および電圧を十分精度よく制御しながら、需給関係を瞬時に調整しなければならない。一方、熱供給に関しては、一般に需給間のある程度の差異は容認されるが、熱移動の遅れと熱輸送によるむだ時間などの時間的履歴を考慮しながら需給関係を満たさねばならない。このように、CGSは電気と熱という基本的に性質の異なるエネルギー供給を行う必要上、システム全体を適切に運用・制御していくことは比較的難しい課題となっている。

システム全体の制御問題を考える場合、その基礎としてシステム全体の動特性シミュレーション・モデルを構築し、システムの動的挙動を把握しなければならない。しかしながら、個別機器やサブシステムに対してはシミュレーション・モデルを構築して分析がなされた例があるが^{(1),(2)}、システム全体についての分析はなされていない。また、筆者らはシステム全体の設計計

画問題や運用計画問題を中心に検討してきたが⁽³⁾、機器の静特性のみを考慮するに留まっており、システムの動的な挙動に関する知見がほとんど得られていないのが現状である。

システムの動的挙動は計測点、制御方策、および配管長などに依存し、システムごとに検討する必要がある。したがって、システム構成や制御方策の各種代替案について、システムの動的挙動を分析しながら合理的な案を容易に選択できるようなシミュレーション・モデルの構築が必要不可欠である。本研究では、シミュレーション言語としてシステム構成や制御方策などの容易な変更を可能にするDYNAMO⁽⁴⁾を採用し、実システムに対するシミュレーション・モデルの構築を行う。さらに、構築したモデルを利用して、計測点や配管長がシステムの動的挙動に与える影響について分析し、本手法の有効性を示す。

主要記号

機器記号

BG: ガスボイラ

CGS: コージェネレーション・システム

CGU: コージェネレーション・ユニット

CT: 冷却塔

* 原稿受付 平成4年8月3日。

^{*1} 正員, 大阪府立大学工学部(〒593 堺市学園町1-1)。^{*2} 大阪ガス(株)(〒550 大阪市西区千代崎3-2-95)。

GE: ガスエンジン

G: 発電機

HEX: 温水熱交換器

MV: 三方弁

PP: 定流量ポンプ

計測器記号

FM: 流量計

TM: 温度計

量記号

A: 熱交換係数 $\text{kW}/^\circ\text{C}$ a: 係数 $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{h})$ c: 比熱 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ F: 都市ガス消費量 m^3/h

K: ゲイン

P: 軸動力 kW Q: 熱流量 kW $\bar{Q}^d$: 熱需要変動量 kW T: 時定数 s t: 時間変数 s V: 配管容量 m^3 W: 体積流量 m^3/s Z_p : 行過ぎ量 $^\circ\text{C}$ θ : 温度 $^\circ\text{C}$ ρ : 密度 kg/m^3 τ : むだ時間 s

添字

atm: 室内 (温度)

d: 需要

f: 定格値

h: 高温側

in: 流入

l: 低温側

out: 流出

2. 対象システム

図1に本研究の対象とした実在のガスエンジンCGSを示す。図中、実線は温水、一点鎖線は燃料の都市ガス、二点鎖線は電力、破線は情報の流れをそれぞれ示す。本CGSは、システムの中核となるコージェネレーション・ユニット (CGU) とガスボイラ (BG)、冷却塔 (CT)、熱交換器 (HEX)、ポンプ (PP)、三方弁 (MV)、およびそれらを継ぐ配管などから構成されている。システム内のCGUは、ガスエンジン発電機 (GE-G)、熱交換器 (HEX1)、三方弁 (MV1)、およびポンプ (PP1) から構成されている。電力需要は買電およびガスエンジン発電機により供給される。熱需要は、ガスエンジン (GE) から回収された排熱、およびガスボイラからの出力により供給される。また、排熱回収量が熱需要量に対して過剰となる場合には、過剰分が冷却塔によって廃棄される。以上の機器の他に、実システムでは冷凍機が設置されている。しかし、本研究では冬季の冷房需要が存在しない場合にのみ動的挙動を実計測する機会を得たので、対象システムから冷凍機を除外した。

3. シミュレーション・モデルの構築

3.1 シミュレーション・モデル ここでは、図1の対象システムに対するシミュレーション・モデルを定常的なパラメトリック・モデルとして構築する。モデル構築の際には、システムを機器単体に分割し、基本的には機器単体を一つの集中定数系と見なして、その入出力関係を一次遅れとむだ時間要素で表現する。システム全体のモデルは、むだ時間を考慮した配管と三方弁により各構成機器を接続して構築される。以下のモデル化では、各機器の機器記号を省略して表現する。

(1) ガスエンジン ガスエンジンのモデルを図2に示す。都市ガス消費量 F による発生熱量 Q_{in} は、むだ時間 τ と係数 a により次式で表すことができる。

$$Q_{in}(t) = a F(t - \tau) \dots\dots\dots (1)$$

また、温水により搬送される熱量 Q_{out} は、水の比熱を c 、密度を ρ 、体積流量を W 、流入温度を θ_{in} 、流出温度を θ_{out} とすると次式で表される。

$$Q_{out}(t) = c \rho W \{ \theta_{out}(t) - \theta_{in}(t) \} \dots\dots\dots (2)$$

図1 対象システム

このとき、ガスエンジン内の温水の代表温度 θ に関する微分方程式は、時定数を T 、ゲインを K_1 、室内温度を θ_{atm} とすると次式となる。

$$T \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = K_1 \{Q_{\text{in}}(t) - Q_{\text{out}}(t)\} + \theta_{\text{atm}} \quad (3)$$

また、ガスエンジンの軸動力 P は、ゲインを K_2 とすると次式で表現される。

$$P(t) = K_2 F(t) \quad (4)$$

以上からガスエンジンのモデルをDYNAMO特有のフロー図で表現すると図3のようになる。図中、Reservoir：蓄積量などの状態量、Conveyer：むだ時間要素、

図2 ガスエンジン・モデル

図3 DYNAMOによるガスエンジンのフロー図

図4 温水熱交換器モデル

Converter：関数, Uni-flow：状態量の変化量(一方向), Bi-flow：状態量の変化量(双方向), Connector：情報の流れ, Cloud：無限にある蓄積量をそれぞれ示す。

(2) 発電機 発電機の発電量はその軸動力で決められる。ただし、起動時には電圧が確立してから遮断機が投入されて負荷運転が開始される。したがって、遮断機が投入されて負荷運転が行われているときは1、そうでないときは0の値をとる係数 ζ を導入して発電量 E を次式で表す。

$$E(t) = \zeta K P(t) \quad (5)$$

ここでは、ガスエンジンを始動してから負荷運転が開始されるまでの時間を t_0 として、ガスエンジンが始動してから t_0 秒後に $\zeta = 1$ とし、それまでおよび停止指令を受けた場合には $\zeta = 0$ とする。

(3) 温水熱交換器 温水熱交換器のモデルを図4に示す。図中、 θ_h 、 θ_l はそれぞれ高温側、低温側の代表温度、 $\theta_{h \text{ in}}$ 、 $\theta_{l \text{ in}}$ はそれぞれの入口温度、 W_h 、 W_l はそれぞれの体積流量である。図4は、高温側および低温側それぞれの流体の温度が均一と考えてモデル化したものである^{(5),(6)}。まず、高温側について考えると、高温側への入力熱量 $Q_{h \text{ in}}(t)$ と温度 $\theta_h(t)$ の関係は次式となる。

$$T_h \frac{d\theta_h(t)}{dt} + \theta_h(t) - \theta_{\text{atm}} = K_h Q_{h \text{ in}}(t) \quad (6)$$

ここで、入力熱量は低温側の交換熱量と温水により持ち込まれた熱量との和となり、次式で表現できる。

$$Q_{h \text{ in}}(t) = c\rho W_h(t) \{\theta_{h \text{ in}}(t) - \theta_h(t)\} + A \{\theta_l(t) - \theta_h(t)\} \quad (7)$$

同様に、低温側は次式となる。

$$T_l \frac{d\theta_l(t)}{dt} + \theta_l(t) - \theta_{\text{atm}} = K_l Q_{l \text{ in}}(t) \quad (8)$$

ここで、

$$Q_{l \text{ in}}(t) = c\rho W_l(t) \{\theta_{l \text{ in}}(t) - \theta_l(t)\} + A \{\theta_h(t) - \theta_l(t)\} \quad (9)$$

また、

$$A = K_A \frac{W_l(t) W_h(t)}{W_{lf} W_{hf}} \quad (10)$$

(4) ポンプ システム内のポンプはすべて定流量ポンプである。CGU内のポンプは、ガスエンジンに対する始動指令の後に運転が開始される。

(5) 三方弁 三方弁の分岐点あるいは合流点における流量および温度は弁開度によって決められる。また、合流する場合、両流体は均一に混合するものとする。弁開度は計測温度と設定温度との偏差に基づきPID制御される。弁開度指示値が制御器から与えられると、弁開度はその指示値に向って等速で変化する。

(6) 配管 配管入口温度 θ_{in} と出口温度 θ_{out} の関係は、むだ時間 τ を考慮して次式で表現する。

$$\theta_{out}(t) = \theta_{in}(t - \tau) \quad (11)$$

ただし、むだ時間 τ は配管容量 V と体積流量 W により次式で表現される。

$$\tau = V / W \quad (12)$$

(7) ガスボイラ ガスボイラは、保有水温度によりオン・オフ制御されている。都市ガス消費量による発生熱量および水により持ち去られる熱量は、それぞれ式(1)、(2)と同様に表される。また、ガスボイラ

を集中定数系として考えると、ガスボイラ保有水代表温度 θ に関する微分方程式は、式(3)と同様に表すことができる。

(8) 冷却塔 ここでは、熱交換器と同様のモデルにより、冷却塔をモデル化する。

以上から、図3のように各機器に対するフロー図を作成してそれらを接続することにより、システム全体のシミュレーション・モデルが構築される。図5にDYNAMOによるCGUのフロー図を示す。構築されたシミュレーション・モデルは一次の微分方程式系であり、数値解法としてオイラー法⁷⁾を採用して、シミュレーションを行う。

3.2 動特性パラメータの決定

図1の対象システムに対するシミュレーション・モデルの動特性パラメータを決定するため、温度計および流量計を設置して、10秒間隔で計測を行った。モデルの各種動特性パラメータについては、シミュレーション結果が実計測データと可能な限り一致するように決定した。一例として、ガスエンジン発電機の起動時における過渡応答を取り上げる。実システムにおける実計測データの都市ガス消費量、温水の流量および流入温度を与条件としてシミュレーションを行い、得られた結果と対応する実計測データを比較検討した。図6にCGUの排熱回収温水出力温度に関するシミュレーション結果および実計測データを示す。図6より、 $t=300 \sim 400$ 秒において温水温度が立ち上がる部分でわずかに差異が見られるものの両者は十分一致していることがわかる。以上のような検討を各構成機器について行うことにより、構成機器の動特性パラメータを決定する。

4. シミュレーション・モデルによる動特性分析

DYNAMOに基づいて構築された本シミュレーション・モデルは、システム構成や制御方策などの変更が容易であるので、その特長を生かして種々の動特性分析が行える。ここでは、その一例として三方弁制御のため

図5 DYNAMOによるCGUのフロー図

図6 CGUの過渡応答

の温度計測点がシステムの動的挙動に及ぼす影響について分析する。

従来、図1のシステム内の三方弁MV2およびMV3は、それぞれ計測点BおよびDにおける温度により制御されている。しかしながら、それ以外にも例えばAおよびCといった計測点による制御が考えられる。そこで、計測点が以下の温水の温度変動に対してどのような影響があるかを分析する。

- (1) 供給側温水温度
- (2) 返り温水温度

表1に計測点の組合せに関する検討ケースを、表2に各点の設定温度を示す。

4.1 供給側温水温度に対する影響分析 温水利用の観点から制御性能を考えると、供給側温水温度の精度が評価の指標として挙げられる。ここでは供給側温水温度として図1のA点およびC点の温度を取り上げ、その過渡応答について調べる。具体的には図7のように、一定量のガスエンジン都市ガス消費量 F 、およびステップ状の変動量 $\bar{Q}^d$ を持つ熱需要量 Q^d を与えて以下検討する。

表1の計測点に対する各検討ケースにおけるA点および

表1 温度計測点

Case \ Valve	MV2	MV3
AC	A	C
AD	A	D
BC	B	C
BD	B	D

表2 各点の設定温度

Measurement point	A	B	C	D
Set point $^{\circ}\text{C}$	74	74	82	74

図7 入力データ

びC点の温度変化をそれぞれ図8(a)および(b)に示す。図8(a)によれば、 $t=0\sim1000$ 秒の熱需要量が零である時間帯ではいずれの検討ケースもA点の温度と設定温度との差が大きいが、 $t=1000\sim1600$ 秒の熱需要量が零でない時間帯にはA点によって制御を行えばA点の設定温度に収束していることがわかる。図8(b)は、C点で制御すればC点の温度と設定温度との差が明らかに小さいことを示している。以上の結果から、供給側温水温度の精度という点においてはA点およびC点で制御する方が望ましいということがわかる。

4.2 返り温水温度に対する影響分析 ガスエンジンの保護という観点から制御性能を考えると、返り温水温度の安定性が重要となる。特に返り温水温度が設定温度から急激に上昇することはガスエンジンにとって望ましくないことである。そこで、ここでは制御性能の評価指標としてD点における温水温度が設定温度から増加したときの行過ぎ量 $|z|$ を取り上げる。返

(a) A点

(b) C点

図8 温度の時間的变化

り温水温度が急激に上昇する外的要因として、熱需要量の急減を考え、表1の各検討ケースについて調べる。特に次の二つの量を変化させて分析する。

- (1) 熱需要変動量の大きさ
- (2) CGS内の各構成機器間の配管長

4・2・1 熱需要変動量による影響分析 ここでは、図7のステップ状の変動量 $\bar{Q}^d$ を10.5から63.0まで10.5kWごとに变化させ、この熱需要変動量が計測点に関する各検討ケースの評価指標に与える影響を分析する。CT~CGU間、CGU~HEX2間、HEX2~CT間それぞれの配管長は等しいものとする。すなわち、配管長を間接的に表現する温水輸送によるむだ時間を、すべて3sとして検討した。

図9に熱需要急減時の行過ぎ量 $|Z_p|$ を示す。図9より、熱需要変動量の減少に伴い、行過ぎ量も減少することがわかる。ただし、検討ケースAC、BCとAD、BDとで状況が異なる。すなわち、

(1) ケースAC、BCの場合 グラフは原点より上方を通り、熱需要変動量が零に近づいても、行過ぎ量が零に収束しない。

(2) ケースAD、BDの場合 グラフはほぼ原点を通る直線で表現でき、熱需要変動量が零に近づくと、行過ぎ量が零に近づく。

以上、返り温水温度の安定性という点においてはD点制御の方がC点制御よりも望ましいことが判明した。この原因は、C点制御はD点制御に比べ、三方弁と制御用温度計間で温水輸送によるむだ時間が発生し、それが制御情報の遅れとなるためであると考えられる。

4・2・2 配管長による影響分析 4・2・1項における分析結果に対する考察に従い、配管長がC点制御とD点制御に対してどのように影響するかを検討する。ここでは配管長を温水輸送によるむだ時間として間接的に

表現し、このむだ時間をパラメータとしてその影響を分析する。

各配管のむだ時間に関する検討ケースを表3のように設定する。また、図7における熱需要変動量 $\bar{Q}^d$ を63 kWとした。図10に熱需要急減時の配管長による行過ぎ量 $|Z_p|$ への影響分析結果を示す。4・2・1項同様、2通りにわけて考察する。

(1) ケースAC、BCの場合 CGU~CT間の配管による温水輸送むだ時間 τ_1 を短くすることにより、行過ぎ量を低く抑えることが可能となることがわかる。これは、フィードバック制御を行う場合、制御用温度計を制御点に可能な限り近づける方が良いということを意味している。

(2) ケースAD、BDの場合 配管長による影響は全くない。行過ぎ量の低減のためには、応答の速い制御用温度計を設置するか、または開閉が速い三方弁を使用する必要がある。

以上の結果から、C点制御は供給側の温度設定という観点からは望ましい制御方法ではあるが、その一方でガスエンジンの保護という観点からはC点制御よりもD点制御の方が望ましいという結果が得られた。現状の

表3 配管のむだ時間

Case	Dead time s			
	CT~CGU τ_1	CGU~HEX2 τ_2	HEX2~CT τ_3	Total $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3$
I	2	14	14	30
II	4	13	13	30
III	6	12	12	30
IV	8	11	11	30

図9 行過ぎ量（熱需要変動量による影響）

図10 行過ぎ量（配管長による影響）

制御方法ではガスエンジンの保護ということを重視した上でD点制御が行われているといえる。

5. 結 論

本論文では、ガスエンジンを主機とするCGSの動特性シミュレーション・モデルを構築した。モデル構築においては、その一般性を十分考慮した上で、シミュレーション言語としてシステム構成や制御方策の各種代替案の容易な検討を可能にするDYNAMOを適用した。さらに、実計測データに基づいて構築したモデルにより種々の分析を行い、以下の主要結果が得られた。

- 1) DYNAMOを適用することによって、ガスエンジンCGSの動特性シミュレーション・モデルを柔軟かつ容易に構築でき、代替案検討に対する有効性についても確認できた。
- 2) 実計測データと比較することにより、一次遅れとむだ時間で基本的に実システムの動特性を表現した本シミュレーション・モデルの有効性が確認できた。
- 3) システムの動特性を分析することにより、各種制御方策の有用性を比較検討することができた。

なお、本研究では、動特性分析の一例として計測点の位置が返り温水温度および供給側温水温度に対して与える影響を分析したが、構築したモデルはそれ以外にも適用可能である。例えば、運用段階の問題に対しては、熱・電力需要パターンがそれぞれ変化した場合

のシステム挙動分析などが考えられる。また、設計段階の問題に対してはモデルの動特性パラメータを変化させることにより構成機器の適切な種類や規模などを検討するといったことも可能である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、ご協力いただいた大阪ガス(株)東野耿二氏および川崎重工業(株)田村潤司氏に、深甚の感謝の意を表します。

文 献

- (1) Thompson, H. A. and Fleming, P. J., Parallel Implementations of Gas Turbine Simulations Using Transputers, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part I*, 205-I3(1991), 199.
- (2) Jericha, H., Perl, T., and Perz, E., Contribution to the Dynamic Simulation of Thermal Power Plants, *Proc. 1991 ASME COGEN-TURBO*, (1991), 263.
- (3) 伊東・横山, コージェネレーションの最適計画, (1990), 25, 産業図書.
- (4) 鈴木, デジタル・シミュレーション(2), システムと制御, 17-10(1973), 614.
- (5) 増淵, 熱交換器の動特性, 機誌, 62-491(1959), 1723.
- (6) 藤堂, 流量変化に対する熱交換器の動特性, 機論, 33-252(1967), 1215.
- (7) 州之内, 数値計算, (1986), 27, サイエンス社.