

2 サイト地域エネルギーシステムにおける コージェネレーションユニットの非線形制御 —電気およびガスフローの同時調整*

星野 光[†]・薄 良彦[‡]・T. John Koo[§]・引原 隆士[†]

Nonlinear Control of Combined Heat and Power Plants in a Two-site Regional Energy System —Simultaneous Regulation of Electricity and Gas Flows*

Hikaru HOSHINO[†], Yoshihiko SUSUKI[‡], T. John KOO[§] and Takashi HIKIHARA[†]

This paper is concerned with coordinated control of combined heat and power (CHP) plants for regional-scale energy management. The objective of the control is to regulate electricity and gas flows (energy flows) through an regional energy system with two CHP plants. In order to manage energy imbalances of demand and supply inside the region, the gas flow is indirectly regulated with tracking control of boiler pressure to a suitable reference trajectory. The output tracking controller is designed by the input-output linearization of a nonlinear state-space model of the energy system. Effectiveness of the proposed controller is established with numerical simulations under a practical set of system parameters.

1. はじめに

電気, 熱, ガスなどを供給するエネルギーシステムは, 小規模かつ個別のシステムから, 大規模かつ互いに結合したシステムへと発展してきた. 近年, これらのエネルギーシステムの統合的な解析, 設計, 制御によるエネルギーの利用効率, 品質, 供給信頼性の向上が期待されている [1,2]. このための要素技術として, コージェネレーション (Combined Heat and Power; CHP) やヒートポンプなどのエネルギー変換機器の活用が重要である. これらの機器の電気供給源としての活用として, 広域の電力系統制御に関わるアンシラリーサービスがあり, 再生可能エネルギー源の出力変動の補完 [3–5] や, デマンド

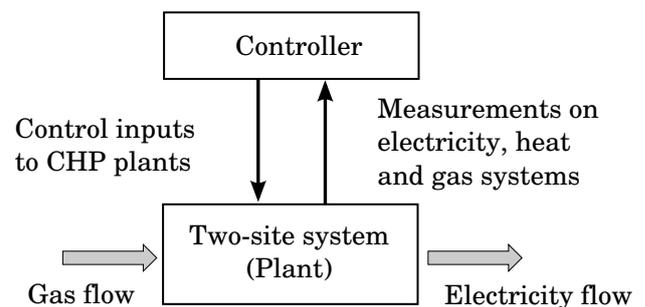


Fig. 1 Schematic diagram of regulation of electricity and gas flows

レスポンス [6] などが提案されている. 一方, 上記の活用では, 変換機器の電気出力の変化に伴い熱出力が変化し, 熱需給の過不足が生じる. 地域冷暖房などの熱供給システムの導入は, 個別の蓄熱槽を導入することなく, 上記の過不足を吸収する方法として期待されている [7,8].

本論文では, 二つの CHP を含む地域エネルギーシステム (2. で詳述) を対象として, 電気, 熱, ガスの地域規模のエネルギーマネジメントについて検討する. 前述の先行研究を受けて, 熱供給システムがエネルギーの蓄積要素として地域内のエネルギー需給の過不足を吸収し, 地域外とのエネルギー授受に相当する電気およびガスフローを独立に調整することを目的とする (Fig. 1 を参照). 単一の CHP では所望の電気供給量を得るためのガス使用量が調整不可能であるのに対し, 複数の CHP の

* 原稿受付 2016年7月8日
第60回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表 (2016年5月)

[†] 京都大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 Department of Electrical Engineering, Kyoto University; Katsura, Nishikyō, Kyoto 615-8510, JAPAN

[‡] 大阪府立大学 大学院工学研究科 電気・情報系専攻 電気情報システム工学分野 Department of Electrical and Information Systems, Osaka Prefecture University; 1-1 Gakuencho, Nakaku, Sakai, Osaka 599-8531, JAPAN

[§] 香港応用科技研究院 Hong Kong Applied Science and Research Institute; Photonics Centre, 2 Science Park East Ave., Hong Kong Science Park, Shatin, Hong Kong

Key Words: energy system, combined heat and power, nonlinear control, decoupling.

協調は、電気供給量を維持したうえでガス使用量のピークを抑制するなどの新たな機能の実現につながる。

また、上記のような地域外とのエネルギー授受の調整は、対象地域を一つのエネルギー変換要素として扱う意味でエネルギーハブ [1] の概念と親和性がある。文献 [9,10] では、蓄熱槽を有する複数のエネルギー変換要素で構成されるネットワークに対して電気およびガスのフローを最適化するモデル予測制御が検討されている。本論文で導出する制御則は、地域エネルギーシステムに対してこれらの最適化手法を実現可能とする意味でも有用である。

上記の機能を達成するためには、地域内で CHP の動作点を大きく変更する制御が求められる。本論文では、このためのフィードフォワードおよびフィードバック則の設計に入出力線形化 [11,12] が有効であることを示す。制御対象の非線形状態方程式モデルに対して、適切な座標変換を数式処理ソフトウェアによりあらかじめ導出しておくことで、非線形性を補償する制御則が導出される。このための状態方程式モデルは筆者らの前報告 [13–16] に基づき導出する。また、入出力線形化を用いる利点として、多入力多出力システムの非干渉化 [11,12] がある。本論文では、二つの CHP の指令値を入力とし、出力については、電気、熱、ガスのうち、電気および熱に関する変数を選択する。これにより、まず、地域外への電気フローの調整を熱およびガスのマネジメントから分離して達成する。つぎに、熱供給システムがエネルギー需給の過不足を吸収するよう制御則を導出し、間接的にガスフローの調整を達成する。

本論文は、筆者らの先行発表 [17] に制御系設計の新たな知見を加えたものであり、構成は以下の通りである。**2.**では、対象のシステム構成および問題設定を述べる。**3.**では対象の数学モデルを導出し、**4.**で [17] を基に入出力線形化の適用結果を示す。**5.**で所望の制御系を設計し、**6.**で数値シミュレーションによりその有効性を検討する。**7.**で本論文をまとめ、今後の課題を述べる。

2. システム構成および問題設定

本節では、検討対象のシステム構成を説明し、問題設定を明確にする。電気およびガスのエネルギーフローを独立に調整するためには、特性（出力比）の異なるエネルギー変換機器を二つ組み合わせたシステムが最小構成となる。本論文では、Fig. 2 に示す特性の異なる二つの CHP を含むシステムを対象とする。Fig. 2 において、CHP と負荷の組を本論文ではサイトとよび、検討対象を 2 サイト地域エネルギーシステムとよぶ。CHP はガスタービン、発電機およびボイラで構成され、都市ガスの供給を受けて電力および蒸気を発生する。二つのサイトは送電線を介して接続され、商用系統への連系点から地域外へ電気を供給する。さらに、二つのサイト間では蒸気配管による熱の融通が可能となっている。二つの CHP

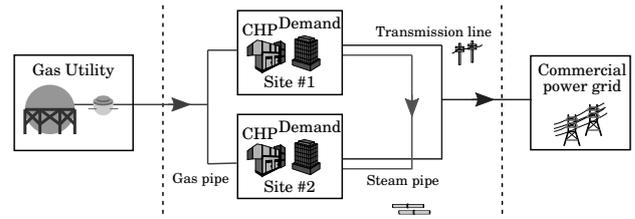


Fig. 2 Schematic diagram of two-site regional energy system which we study in this paper

のガス使用量の合計および連系点電力がそれぞれ Fig. 1 のガスおよび電気フローに対応する。

つぎに、制御系の設計方針を述べる。本論文では、二つの CHP により連系点電力およびガス使用量を調整するため、その影響が地域内の熱供給システムにおけるエネルギーの過不足として現れる。一方、熱供給システムで吸収できるエネルギーの過不足には許容範囲がある。本論文で扱うボイラの場合には、需給がバランスした定常状態に対してガス使用量が多い（少ない）場合には、エネルギーが余り（不足し）、蒸気圧力が上昇（低下）する [18,19]。したがって、ボイラ圧力が許容範囲に収まる場合に上記の電気およびガスの調整が可能である。本論文では、熱とガスに関する上記の物理的対応を基に、ボイラ圧力が増加（または減少）する目標軌道への追従により、間接的にガス使用量が調整可能であることを理論的に示す。連系点電力の目標値追従と同時に、ガス使用量を目標値へ収束させるように、ボイラ圧力の目標軌道を設計しこれへの追従を達成する制御則を導出する。これは、ボイラ圧力が許容の範囲内に収まるよう適切な目標軌道への追従を行うことでガス使用量を調整するエネルギーマネジメントの実現につながる。

3. 数学モデル

本節では、前報告 [13–16] に基づき検討対象の数学モデルを導出する。本モデルはガスタービン、電気ネットワークおよび熱ネットワークの三つのサブシステムで構成される。ガスタービンは二つのサイトの CHP に含まれ、都市ガスの燃焼によって発電機への機械的トルクを発生し高温排気を放出する。サイト # i のガスタービンで発生する機械的入力 P_{mi} は発電機を介して電気ネットワークへと伝達される。同時に排気からは単位時間あたり Q_{ai}^t の熱量が吸収され、熱ネットワークのボイラで蒸気が発生する。

3.1 ガスタービン

ガスタービンの動特性としては指令値に対する応答遅れを考慮し、文献 [20] のモデルを単純化したものを用いる。状態変数は以下の通りである（ベクトルまたは行列の転置を T で表す）。

$$x_g := \left[v_{p1}, w_{f1}, w_{t1}, v_{p2}, w_{f2}, w_{t2} \right]^T \quad (1)$$

ただし、 v_{pi} は燃料バルブの位置を表し、 w_{fi} および w_{ti} は燃焼器およびタービンにおける燃料流量を表す。各変数はそれぞれ定格の値で単位化されており、 $[0,1]$ の範囲の値をとる。変数 x_g のダイナミクスは次式で表される。

$$T_{vi}\dot{v}_{pi} = -v_{pi} + W_{oi} + (1 - W_{oi})u_i \quad (2a)$$

$$T_{fi}\dot{w}_{fi} = -w_{fi} + v_{pi} \quad (2b)$$

$$T_{CDi}\dot{w}_{ti} = -w_{ti} + w_{fi} \quad (2c)$$

ただし、 $i=1,2$ であり、入力 $u_i \in [0,1]$ は CHP の指令値に相当する。パラメータ T_{vi} 、 T_{fi} および T_{CDi} はそれぞれバルブ、燃料供給システムおよびコンプレッサ排気の時定数である。パラメータ W_{oi} は燃料流量の下限を表す。ここで、機械的入力 P_{mi} および熱入力 Q'_{ai} はそれぞれ以下で与えられる。

$$P_{mi}(w_{ti}) := K_{ei} \frac{w_{ti} - W_{oi}}{1 - W_{oi}} \quad (3a)$$

$$Q'_{ai}(w_{fi}) := K_{hi} \frac{w_{fi} + \beta_i}{1 + \beta_i} \quad (3b)$$

ただし、 K_{ei} および K_{hi} は機械的入力および熱入力の定格値に相当し、定数 $K_{hi}(W_{oi} + \beta_i)/(1 + \beta_i)$ は $u_i = 0$ に相当する熱出力の値を表す。ここで二つの CHP によるガス使用量 P_{gas} は次式で与えられる。

$$P_{gas}(x_g) := w_{f1} + w_{f2} \quad (4)$$

3.2 電気ネットワーク

電気ネットワークに関しては、動揺方程式 [21] に基づき発電機の電気機械的な動特性を考慮する。対応する状態変数は下記の通りである。

$$x_e := \left[\delta_1, \omega_1, \delta_2, \omega_2 \right]^T \quad (5)$$

ただし、 δ_i は発電機の相差角を表し、 ω_i は回転角周波数偏差を表す。変数 δ_i は電気角であり、 ω_i は基準量 $\omega_r := \sqrt{\omega_s/2H_i}$ で無次元化されている。ただし、 ω_s および H_i は発電機の同期速度および単位慣性定数を表す。変数 x_e の動特性は次式で表される。

$$T_{ei}\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (6a)$$

$$T_{ei}\dot{\omega}_i = P_{mi}(x_g) - D_i\omega_i - P_{ei}(\delta_1, \delta_2) \quad (6b)$$

ただし、 $T_{ei} := 1/\omega_r$ であり、 D_i は減衰係数を表す。関数 $P_{ei}(\delta_1, \delta_2)$ は発電機の電氣的出力を表す。

$$P_{ei}(\delta_1, \delta_2) = \sum_{j \in \{1,2,\infty\}} P_{ij}(\delta_1, \delta_2) \quad (7)$$

ただし、記号 ∞ は商用系統に相当する無限大母線を表し、 $P_{ij}(\delta_1, \delta_2)$ は以下で与えられる。

$$P_{ij}(\delta_1, \delta_2) = E_i E_j \{ G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \} \quad (8)$$

ただし、 $\delta_\infty = 0$ であり、 E_i は過渡リアクタンス背後電圧に対応する。パラメータ $G_{ij} + jB_{ij}$ は電圧 E_i および E_j の間の伝達アドミタンスを表す。電力消費および送電線における損失は G_{ij} で表される。同様に、商用系統への連系点電力は次式で表される。

$$P_{e\infty}(\delta_1, \delta_2) = -P_{\infty 1}(0, \delta_1) - P_{\infty 2}(0, \delta_2) \quad (9)$$

3.3 熱ネットワーク

熱ネットワークについては、文献 [18,19,22] に基づき前報告 [14-16] で導出した、ボイラ圧力および配管内の蒸気流速の時間変化を記述するモデルを用いる。モデルの導出の詳細は [14-16] を参照されたい。状態変数は以下の通りである。

$$x_h := \left[p_1, p_2, w \right]^T \quad (10)$$

ただし、 p_i はボイラ圧力の基準値からの偏差を表し、 $w (> 0)$ は蒸気流速を表す。変数 w および p_i はそれぞれ基準量 $w_r := Q'_r/d^2 h_r \rho_r$ および $p_r := \rho_r w_r^2$ で無次元化されている。定数 Q'_r 、 h_r および ρ_r はそれぞれ熱輸送量、比エンタルピーおよび蒸気密度の基準量を表す。パラメータ d は配管の内径を表す。変数 x_h のダイナミクスは次式で表される。

$$T_{h1}\dot{p}_1 = Q'_{a1}(x_g) - Q'_{L1} - Q'_{12}(w) \quad (11a)$$

$$T_{h2}\dot{p}_2 = Q'_{a2}(x_g) - Q'_{L2} - Q'_{21}(w) \quad (11b)$$

$$T_{h3}\dot{w} = \frac{1}{\rho_s}(p_1 - p_2) - \frac{\lambda L}{2d} w^2 \quad (11c)$$

ただし、 Q'_{Li} は各サイトの熱負荷、 ρ_s は蒸気密度、 L は配管長、 λ は摩擦係数を表す。関数 $Q'_{12}(w)$ および $Q'_{21}(w)$ は熱輸送を表し、以下で与えられる。

$$Q'_{12}(w) = -Q'_{21}(w) = \frac{\pi}{4} h_c \rho_s w \quad (12)$$

ただし、 h_c は蒸発潜熱を表す。時定数 T_{hi} について、 $i=1,2$ に対しては $T_{hi} := Q'_r e_i / d^4 h_r^2 \rho_r$ であり、 e_i はボイラに蓄積された内部エネルギーの圧力変化に対する変化率を表す。時定数 T_{h3} は $T_{h3} := d^2 L h_r \rho_r / Q'_r$ で与えられる。

4. 入出力線形化の適用

本節では、検討対象の非線形状態方程式モデルに対して入出力線形化 [11,12] を適用する。本方法により、システムの電気と熱の二つの出力を非干渉化し、それぞれの出力の目標値（目標軌道）への追従を達成する。本論文での制御系設計ではシステムの最小位相性 [11,12] が前提である。以下では、下記の出力変数に対して入出力線形化の適用結果およびシステムの最小位相性の条件を導出する。

$$y_1 = h_1(x) := P_{e\infty}(x_{e1}, x_{e3}) \quad (13a)$$

$$y_2 = h_2(x) := \frac{T_{h1}x_{h1} + T_{h2}x_{h2}}{T_{h1} + T_{h2}} \quad (13b)$$

ただし、出力 y_1 は (9) 式で与えられる連系点電力であり、 y_2 はボイラ圧力の (調和) 平均を表す。対象とする状態空間 X は $x := (x_g^T, x_e^T, x_h^T)^T$ として以下で与えられる。

$$X := \{x \in \mathbb{R}^{13} \mid x_{gi} \in [0, 1], i = 1, \dots, 6, x_{h3} > 0\} \quad (14)$$

このとき、制御対象の状態方程式モデルは次式となる。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_g \\ \dot{x}_e \\ \dot{x}_h \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} f_g(x) \\ f_e(x) \\ f_h(x) \end{bmatrix}}_{f(x)} + \sum_{j=1}^2 \underbrace{\begin{bmatrix} g_{gj}(x) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{g_j(x)} u_j \quad (15a)$$

$$y = \begin{bmatrix} h_1(x) & h_2(x) \end{bmatrix}^T \quad (15b)$$

ただし、関数 f_g, f_e, f_h, g_{g1} および g_{g2} は前節の数学モデルで与えられる非線形関数である。

システム (15) に対する入出力線形化の適用結果は以下の補題で与えられる。

【補題 1】 出力 (13) を有するシステム (15) を考える。このとき、状態空間 X のある開集合 D が存在し、 $x \in D$ においてベクトル相対次数が $\{5, 3\}$ となる。さらに、つぎの変数 η で内部ダイナミクスを記述できる。

$$\eta := \begin{bmatrix} x_{g3}, x_{e1}, x_{e2}, x_{h1} - x_{h2}, x_{h3} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

(証明) 本補題の証明では、状態方程式モデル (15) の数式処理ソフトウェアによる解析を援用する。出力 (15) に対する非干渉化行列 $A(x)$ は出力 y_1 および y_2 をそれぞれ 5 回および 3 回微分することで得られる：

$$A(x) := \begin{bmatrix} L_{g1} L_f^4 h_1(x) & L_{g2} L_f^4 h_1(x) \\ L_{g1} L_f^2 h_2(x) & L_{g2} L_f^2 h_2(x) \end{bmatrix} \quad (17)$$

ただし、 $L_f h$ は h の f に沿うリー微分を表す。行列 $A(x)$ は変数 x_e のみに依存することが確かめられ、その行列式は次式となる。

$$\det A(x) = -A_1 \frac{dP_{\infty 1}}{dx_{e1}}(x_{e1}) + A_2 \frac{dP_{\infty 2}}{dx_{e3}}(x_{e3}) \quad (18)$$

ただし、 A_1 および A_2 は正の定数であり、数学モデルのパラメータにより決まる。上式において $P_{\infty 1}$ および $P_{\infty 2}$ は (8) 式で与えられ、 $\det A(x)$ が恒等的に零となることはない。したがって、ベクトル相対次数が $\{5, 3\}$ となる開集合 $D_1 \subset X$ が存在する。さらに、 D_1 上で以下の座標変換 Φ を考える。

$$\Phi: x \mapsto (\xi_e, \xi_h, \eta) \quad (19)$$

ただし、変数 ξ_e および ξ_h は次式で与えられる。

$$\xi_e := \begin{bmatrix} h_1(x) & L_f h_1(x) & \dots & L_f^4 h_1(x) \end{bmatrix}^T \quad (20a)$$

$$\xi_h := \begin{bmatrix} h_2(x) & L_f h_2(x) & L_f^2 h_2(x) \end{bmatrix}^T \quad (20b)$$

このとき、ヤコビ行列式 $\det D\Phi(x)$ は以下で与えられる。

$$\det D\Phi(x) = F_0 \left\{ \frac{dP_{\infty 2}}{dx_{e3}}(x_{e3}) \right\}^3 \cdot \left\{ F_1 \frac{dP_{\infty 1}}{dx_{e1}}(x_{e1}) - F_2 \frac{dP_{\infty 2}}{dx_{e3}}(x_{e3}) \right\} \cdot \left\{ F_3 \frac{dP_{\infty 1}}{dx_{e1}}(x_{e1}) - F_4 \frac{dP_{\infty 2}}{dx_{e3}}(x_{e3}) \right\} \quad (21)$$

ただし、 F_0, \dots, F_4 は数学モデルのパラメータによって決まる正の定数である。前述と同様の議論から、ある開集合 $D_2 \subset X$ が存在して $x \in D_2$ に対して $\det D\Phi(x) \neq 0$ となる。 $\det A(x) = 0$ または $\det D\Phi(x) = 0$ をみたす X 内の集合と交わらないように開集合 $D := D_1 \cap D_2$ をとれば補題 1 が得られる。□

補題 1 より、集合 D 上で内部ダイナミクスは次式で表される。

$$\dot{\eta} = q(\xi_e, \xi_h, \eta) := \bar{q}(\Phi^{-1}(\xi_e, \xi_h, \eta)) \quad (22)$$

ただし、関数 $\bar{q}(\cdot)$ は以下で与えられる。

$$\bar{q}(\cdot) := \begin{bmatrix} f_{g3}(\cdot), f_{e1}(\cdot), f_{e2}(\cdot), f_{h1}(\cdot) - f_{h2}(\cdot), f_{h3}(\cdot) \end{bmatrix}^T$$

システムの最小位相性は、出力を目標値 y_1^{ref} および y_2^{ref} からの偏差 e_s とおきなおすことで検討できる。

$$e_s := [y_1 - y_1^{\text{ref}}, y_2 - y_2^{\text{ref}}]^T \quad (23)$$

すなわち、 $e_s \equiv 0$ とおいた場合のゼロダイナミクスを検討することで、最小位相性についてつぎの定理が成立する。

【定理 1】 与えられた目標値 $y_1^{\text{ref}} = P_{e\infty}^{\text{ref}}$ および $y_2^{\text{ref}} = p^{\text{ref}}$ に対して、システム (15) の平衡点 x^* で $e_s = 0$ となるものが存在するとする。このとき、(i) 点 x^* が補題 1 の開集合 D に属し、(ii) つぎの行列 Q

$$Q := \frac{\partial q}{\partial \eta} ([P_{e\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, [p^{\text{ref}}, 0, 0]^T, \eta^*) \quad (24)$$

の固有値の実部がすべて負となるならば、(15a) および (23) 式で記述されるシステムは点 x^* で最小位相である。

(証明) 補題 1 の条件および最小位相性の定義 [11,12] より明らか。□

5. 制御系の設計

本節では、Fig. 1 に示す電気およびガスフローを調整する制御器を設計する。これは、出力 (13) の適切な目標軌道への追従によって間接的に達成される。以下では、目標軌道追従のためのフィードフォワードおよびフィードバック則の設計を議論する。前節の結果より、出力 (13) と入力との関係は次式で表される [11,12]。

$$\begin{bmatrix} y_1^{(5)} \\ y_2^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_f^5 h_1(x) \\ -L_f^3 h_2(x) \end{bmatrix} + A(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

ただし、 $y_i^{(n)}$ は y_i の n 階の時間微分を表す。関数 $L_f^5 h_1(x)$, $L_f^3 h_2(x)$ および行列 $A(x)$ は、数式処理ソフトウェアにより計算可能であり、状態 x の関数である。上の (25) 式を用いることで、出力を目標軌道へ追従させるフィードフォワード則が導出される。まず、つぎの入力

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = A^{-1}(x) \begin{bmatrix} -L_f^5 h_1(x) + v_1 \\ -L_f^3 h_2(x) + v_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

を考えると、 $y_1^{(5)} = v_1$ および $y_2^{(3)} = v_2$ を得る。すなわち、 y_1 と y_2 に関してそれぞれ独立の制御を検討できる。目標軌道をそれぞれ $y_1^{\text{ref}}(t)$ および $y_2^{\text{ref}}(t)$ とおくと、出力が目標軌道に完全に追従した状況では $\xi_e(t)$ および $\xi_h(t)$ は次式を満たす。

$$\xi_e(t) = [y_1^{\text{ref}}(t), \dot{y}_1^{\text{ref}}(t), \dots, y_1^{\text{ref}(4)}(t)]^T \quad (27a)$$

$$\xi_h(t) = [y_2^{\text{ref}}(t), \dot{y}_2^{\text{ref}}(t), y_2^{\text{ref}(2)}(t)]^T \quad (27b)$$

これらをそれぞれ ξ_e^{ref} および ξ_h^{ref} とおくと、所望のフィードフォワード則は (26) において、 $v_1 = y_1^{\text{ref}(5)}$, $v_2 = y_2^{\text{ref}(3)}$ および $x = \Phi^{-1}(\xi_e^{\text{ref}}, \xi_h^{\text{ref}}, \eta)$ とおくことで得られる。ただし、座標変換 Φ は (19) 式で与えられる。変数 η は次式を解くことで与えられる。

$$\dot{\eta} = q(\xi_e^{\text{ref}}, \xi_h^{\text{ref}}, \eta) \quad (28)$$

上記フィードフォワード制御による目標軌道への追従は $\xi_e(0) = \xi_e^{\text{ref}}(0)$ および $\xi_h(0) = \xi_h^{\text{ref}}(0)$ のとき可能である。

上記に加えて、初期値のずれやモデルの不確かさに対応するフィードバック則を設計する必要がある。さまざまな方法が提案されている [12,24]。本論文では、適切な目標軌道を安定化することで電気およびガスフローの調整が可能であることを理論的に示すため、入出力線形化を直接用いた極配置により制御則を導出する。商用システムへの連系点電力の調整は y_1 の目標値追従により達成できる。一方、ガス使用量の調整に関しては、前節で出力としたボイラ圧力 y_2 を介して間接的に行う。定常状態に対してガス使用量が多い（少ない）場合には、エネルギーが余り（不足し）、結果として圧力は上昇（低下）する。そこで、本論文では、 y_2 に関してランプ状の目標値を与えた場合の閉ループ系の安定性を検討することで、ガス使用量が調整可能であることを示す。すなわち、以下の目標値 y_1^{ref} および y_2^{ref} を考える。

$$y_1^{\text{ref}}(t) := P_{e\infty}^{\text{ref}} \quad (29a)$$

$$y_2^{\text{ref}}(t) := p^{\text{ref}} + t\Delta p^{\text{ref}} \quad (29b)$$

目標値 (29) に対して、入出力線形化に基づく制御則は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_{e1}\tilde{\xi}_{e1}\cdots-\alpha_{e5}\tilde{\xi}_{e5} \\ -\alpha_{h1}\tilde{\xi}_{h1}\cdots-\alpha_{h3}\tilde{\xi}_{h3} \end{bmatrix} \quad (30)$$

ただし、 α_{ej} および α_{hj} は制御器のパラメータである。変数 $\tilde{\xi}_e$ および $\tilde{\xi}_h$ は目標値との偏差である：

$$\tilde{\xi}_e := [\xi_{e1} - P_{e\infty}^{\text{ref}}, \xi_{e2}, \xi_{e3}, \xi_{e4}, \xi_{e5}]^T \quad (31a)$$

$$\tilde{\xi}_h := \begin{bmatrix} \xi_{h1} - p^{\text{ref}} - t\Delta p^{\text{ref}} \\ \xi_{h2} - \Delta p^{\text{ref}} \\ \xi_{h3} \end{bmatrix} \quad (31b)$$

変数 $\tilde{\xi}_e$ および $\tilde{\xi}_h$ を用いると、閉ループ系は次式で表される。

$$\dot{\tilde{\xi}}_e = A_e \tilde{\xi}_e \quad (32a)$$

$$\dot{\tilde{\xi}}_h = A_h \tilde{\xi}_h \quad (32b)$$

$$\dot{\eta} = q(\tilde{\xi}_e + [P_{e\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, \tilde{\xi}_h + [p^{\text{ref}} + t\Delta p^{\text{ref}}, \Delta p^{\text{ref}}, 0]^T, \eta) \quad (32c)$$

ただし、行列 A_e および A_h は以下で与えられる。

$$A_e := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_{e1} & -\alpha_{e2} & -\alpha_{e3} & -\alpha_{e4} & -\alpha_{e5} \end{bmatrix} \quad (33a)$$

$$A_h := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_{h1} & -\alpha_{h2} & -\alpha_{h3} \end{bmatrix} \quad (33b)$$

本論文の目標値 (29) は時間無限大では発散するため、実システムへの適用ではある有限時間区間に対して使用可能である。ここで、圧力について、**3.3** で説明した無次元化の基準量は $\rho_r w_r^2$ （動圧）であり、ボイラの絶対圧（静圧）と比べると小さい。このため、(29b) 式のランプ状の変化が問題となる時間スケール（上記の有限区間）は、閉ループ系の時定数に比べて十分長い。したがって、本論文の制御系の設計に関しては圧力が発散する目標値を設定しても実用上問題ない。なお、蒸気供給システムの無次元化と時間スケールに関する議論は文献 [16] として別に報告している。上記の発散が問題となる長時間スケールでの目標値（起動）の設定については今後の課題である。

一方、圧力以外の状態変数については、制御則 (30) のもとで有界性が保証される必要がある。本論文では、閉ループ系の解の安定性について以下の定理が成立することを示す。

【定理 2】 システム (15) に対して制御則 (26) および (30) を適用する。与えられた $P_{e\infty}^{\text{ref}}$ および Δp^{ref} に対して次式を満たす η^{ref} が存在するとする。

$$q([P_{e\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, [0, \Delta p^{\text{ref}}, 0]^T, \eta^{\text{ref}}) = 0 \quad (34)$$

点 $(\xi_e, \xi_h, \eta) = ([P_{e\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, [0, \Delta p^{\text{ref}}, 0]^T, \eta^{\text{ref}})$ が補題 1 の開集合 D に属するならば、次式で表される偏差系 (32) の平衡点が存在する。

$$(\tilde{\xi}_e(t), \tilde{\xi}_h(t), \eta(t)) = (0, 0, \eta^{\text{ref}}) \quad (35)$$

さらに、多項式 $s^5 + \alpha_{e5}s^4 + \dots + \alpha_{e1}$ および $s^3 + \alpha_{h3}s^2 + \dots + \alpha_{h1}$ がフルピッツであるとし、次式で与えられる行列 \tilde{Q} の固有値の実部がすべて負とする。

$$\tilde{Q} := \frac{\partial q}{\partial \eta} ([P_{e\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, [0, \Delta p^{\text{ref}}, 0]^T, \eta^{\text{ref}}) \quad (36)$$

このとき、偏差系の平衡点 (35) は局所漸近 (指数) 安定である。

(証明) 関数 $q(\xi_e, \xi_h, \eta)$ の変数への依存関係を考える。関数 q は (22) 式より x の関数 \bar{q} として与えられるため、 x が ξ_e, ξ_h および η にどう依存するかを知る必要がある。このために、まず、変数 ξ_e および ξ_h の x との関係を検討する。変数 ξ_e について、(2) 式および (6) 式の右辺に x_h が含まれないため、(20a) 式で定義される ξ_e は、 x_g および x_e のみの関数となる。変数 ξ_h についても同様に x_g および x_h のみに依存する。さらに、 ξ_{h2} を考えると $L_f h_2(x)$ は x_g のみの関数であることがわかる。(2) 式の右辺が x_g のみを含むため、 ξ_{h3} も x_g のみの関数となる。以上の議論から、つぎの座標変換 Φ' が定義できる。

$$\Phi' : (x_g, x_e) \mapsto (\xi_e, [\xi_{h2}, \xi_{h3}]^T, [\eta_1, \eta_2, \eta_3]^T) \quad (37)$$

さらに、 Φ と等価な $\bar{\Phi} : x \mapsto (\Phi'(x_g, x_e), \xi_{h1}, \eta_4, \eta_5)$ を考えると次式が成立する。

$$D\bar{\Phi}(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi'}{\partial x_g} & \frac{\partial \Phi'}{\partial x_e} & 0 \\ 0 & 0 & \left[\frac{\partial \xi_{h1}}{\partial x_h}, \frac{\partial \eta_4}{\partial x_h}, \frac{\partial \eta_5}{\partial x_h} \right]^T \end{bmatrix} \quad (38)$$

補題 1 の開集合 D 上で $\det D\Phi(x) \neq 0$ なので、 $\det D\bar{\Phi} \neq 0$ となり、座標変換 Φ' は D 上で一対一である。したがって、座標変換 Φ'^{-1} を考えたとき、 x_e および x_g は ξ_{h1}, η_4 および η_5 に依存しない。さらに、 $\bar{q}(x)$ は x_h に関して $x_{h1} - x_{h2} = \eta_4$ および $x_{h3} = \eta_5$ の項のみを含む。したがって $q(\xi_e, \xi_h, \eta)$ は ξ_{h1} に依存せず、(32c) 式は次式と等価である。

$$\dot{\eta} = q(\tilde{\xi}_e + [P_{e\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, \tilde{\xi}_h + [0, \Delta p^{\text{ref}}, 0]^T, \eta) \quad (39)$$

したがって $(\tilde{\xi}_e(t), \tilde{\xi}_h(t), \eta(t)) = (0, 0, \eta^{\text{ref}})$ は閉ループ系の平衡点である。また、安定性は以下の行列の固有値で決定される。

$$\begin{bmatrix} A_e & 0 & 0 \\ 0 & A_h & 0 \\ * & * & \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (40)$$

仮定より、 A_e, A_h および \tilde{Q} の固有値はすべて負なので、

解 (35) は漸近 (指数) 安定である。 \square

定理 2 より、 $\Phi'(x_g, x_e)$ は一定値へ収束するため、 $\dot{x}_g = \dot{x}_e = 0$ となる。したがって、(2) および (6) 式よりつぎの結果を得る。

【系 1】 システム (15) に対して制御則 (26) および (30) を適用する。与えられた $P_{e\infty}^{\text{ref}}$ および Δp^{ref} に対して定理 2 の仮定が成立するとする。このとき偏差系の平衡点 (35) 上で、圧力 x_{h1} および x_{h2} を除く状態変数 x は一定値となり、連系点電力 $P_{e\infty}$ およびガス使用量 P_{gas} は次式を満たす。

$$P_{e\infty} = P_{e\infty}^{\text{ref}} \quad (41)$$

$$P_{\text{gas}} = P_{m1}^{-1}(P_{e1}(x_{e1}^{\text{ref}}, x_{e3}^{\text{ref}})) + P_{m2}^{-1}(P_{e2}(x_{e1}^{\text{ref}}, x_{e3}^{\text{ref}})) \quad (42)$$

ただし、 x_{e1}^{ref} および x_{e3}^{ref} は (37) 式の座標変換 Φ' を用いて次式で与えられる。

$$x_{ej}^{\text{ref}} := \Phi'_{j+6}^{-1}([P_{e\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, [\Delta p^{\text{ref}}, 0]^T, [\eta_1^{\text{ref}}, \eta_2^{\text{ref}}, \eta_3^{\text{ref}}]^T) \quad (43)$$

ただし、 $j = 1, 3$ とする。

以上の議論では、目標値 (目標軌道) に関する $P_{e\infty}^{\text{ref}}$ および Δp^{ref} が与えられた場合に定理 2 の条件を用いて連系点電力 $P_{e\infty}$ およびガス使用量 P_{gas} の最終値が評価可能であることを示した。 $P_{e\infty}^{\text{ref}}$ が一定の場合、 Δp^{ref} に対して P_{gas} が定まるため、逆に所望の P_{gas} の最終値に対して Δp^{ref} を陰的に計算することができる。これを踏まえて、本論文で導出した制御則のもとでの閉ループ系の構造を Fig. 3 に示す。出力 $y_1 = \xi_{e1}$ および $y_2 = \xi_{h1}$ の目標軌道 (29) 式への追従によって $P_{e\infty}$ および P_{gas} の目標値への調整を達成する。なお、 Δp^{ref} と P_{gas} の関係については 6.2 で検討する。

6. 数値シミュレーション

本節では、導出した制御則 (30) の有効性を数値例によって確認する。まず、 $\Delta p^{\text{ref}} = 0$ の場合に対して二つの出力の非干渉化を確認する。つぎに、 Δp^{ref} を適切に選ぶことで、連系点電力およびガス使用量の制御が可能であることを示す。数学モデルのパラメータは文献 [18, 20, 21, 23] に基づき、Table 1 に示す値に設定した。

6.1 連系点電力およびボイラ圧力の非干渉化

はじめに、補題 1 の条件を Fig. 4 に示す。図において実線は $\det A(x) = 0$ となる集合を示しており、破線は $\det D\Phi(x) = 0$ を示している。本論文では、 $(x_{e1}, x_{e3}) = (0, 0)$ を含むこれらの曲線の内側の領域を D とする。

つぎに、定理 1 に基づきシステムの最小位相性の条件を確認する。ただし、前節の結果より、 q は ξ_{h1} に依存しないため、行列 Q は p^{ref} に依存せず $P_{e\infty}^{\text{ref}}$ により定まる。Fig. 4 の \times は目標値 y_1^{ref} を変化した場合の x_{e1}^* および x_{e3}^* の値を示す。本数値計算により、 $P_{e\infty}^{\text{ref}} \in [0.6, 1.32]$ の

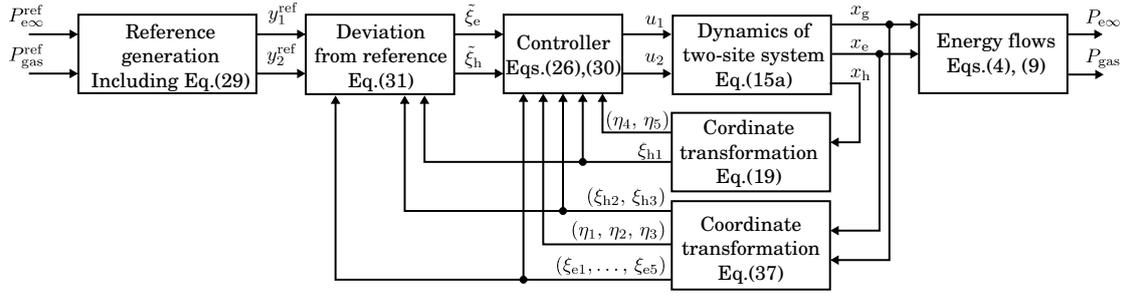
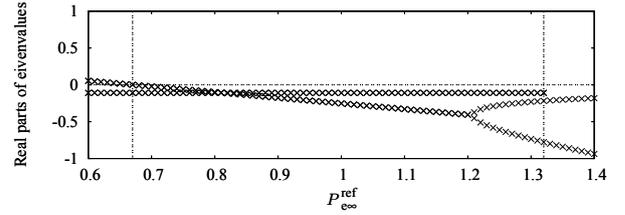
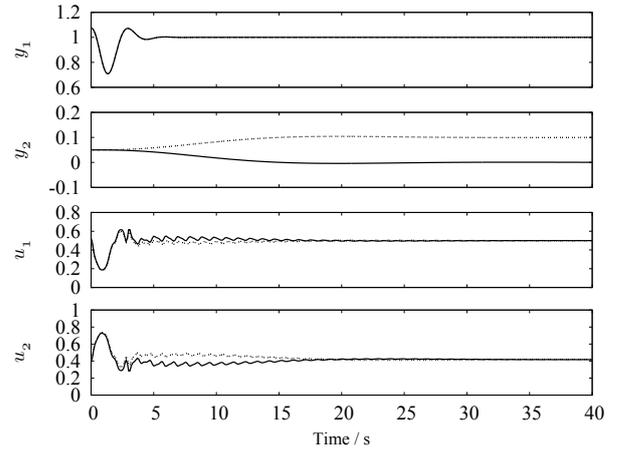
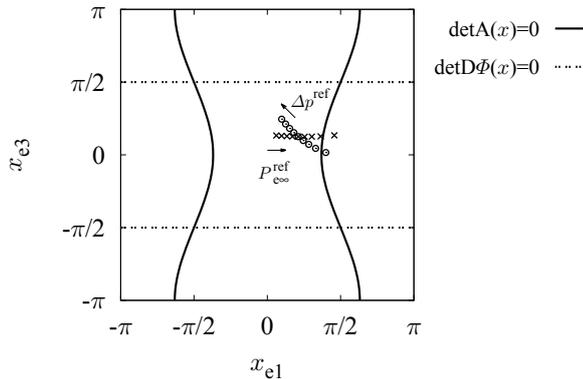


Fig. 3 Block diagram of the proposed controller for two-site regional energy system

Table 1 Parameters for numerical simulation

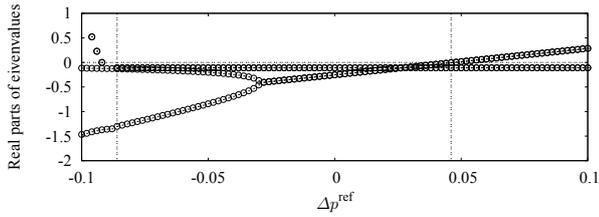
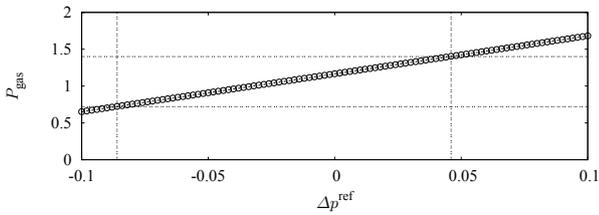
Symbol	Meaning	Value
T_{vi}	Valve positioner time constant	0.05s
T_{fi}	Fuel system time constant	0.4s
T_{CDi}	Compressor volume time constant	0.1s
W_{oi}	Fuel valve lower limit	0.23p.u.
K_{e1}	Rated mechanical power #1	7.5MW
K_{e2}	Rated mechanical power #2	3.0MW
K_{hi}	Rated heat output	6.0MJ/s
β_i	Coefficient for no fuel condition	0
ω_s	Synchronous speed	377 rad/s
H_i	Per-unit inertia time constant	10s
D_i	Damping coefficient	0.05p.u.
E_i	Voltage of the generator	1.0p.u.
B_{i0}	Transfer susceptance to infinite bus	1.0p.u.
B_{12}	Transfer susceptance	0.5p.u.
G_{ij}	Transfer conductances	0
p_0	Nominal value of pressure	800kPa
ρ_s	Density of saturated steam	4.161 kg/m ³
h_s	Specific enthalpy of steam	2768 kJ/kg
h_w	Specific enthalpy of water	721.0 kJ/kg
e_i	Coefficient of pressure variation	3073J/Pa
d	Diameter of the steam pipe	0.2m
L	Length of the pipe	200 m
λ	Friction coefficient	0.016
Q'_{L1}	Heat consumption at site #1	2.0MJ/s
Q'_{L2}	Heat consumption at site #2	5.0MJ/s


 Fig. 5 Real parts of eigenvalues of Q for various P_{∞}^{ref}

 Fig. 6 Time responses of outputs y_1 and y_2 and inputs u_1 and u_2 . The solid line shows the responses under $y_2^{\text{ref}} = 0$, and the broken line under $y_2^{\text{ref}} = 0.1$.

 Fig. 4 Singularity condition of $A(x)$ and $D\Phi(x)$

範囲に対して平衡点は開集合 D 中にあることがわかった。対応する行列 Q は $P_{\infty}^{\text{ref}} < 1.2$ の範囲で 2 組の複素共役な固有値と一つの実固有値をもつ。実固有値は -10 付近に存在し、2 組の複素固有値の実部は Fig. 5 に示す結果となった。図より $y_1^{\text{ref}} < 0.67$ で固有値の実部が正となる

ことが確認できる。また、 $y_1^{\text{ref}} = 1.32$ では固有値が不連続に変化している。これは平衡点上で $\det A(x) = 0$ となることに対応しており、この付近では制御入力 (30) が過大となる。したがって、システム (15) は $P_{\infty}^{\text{ref}} \in [0.67, 1.32]$ の範囲で最小位相となることがわかる。

以上で求めた範囲に対して $\Delta p^{\text{ref}} = 0$ とおいた制御則 (30) の適用結果を確認する。Fig. 6 は、2 組の目標値 $(y_1^{\text{ref}}, y_2^{\text{ref}}) = (P_{\infty}^{\text{ref}}, p^{\text{ref}})$ に対する閉ループ系の応答を示す。図の実線は $(P_{\infty}^{\text{ref}}, p^{\text{ref}}) = (1.0, 0)$ の場合の応答を示し、破線は $(P_{\infty}^{\text{ref}}, p^{\text{ref}}) = (1.0, 0.1)$ の応答を示している。初期値はいずれの場合も $(P_{\infty}^{\text{ref}}, p^{\text{ref}}) = (1.0, 0)$ に対応する平衡点 x^* に対して $x_{e1} = x_{e1}^* + 0.1$ および $x_{h1} = x_{h1}^* + 0.1$ と設定した。制御器のゲイン α_{ei} および α_{hi} については、行列 A_e および A_h の固有値の実部がすべて負となる範囲で、各時刻 t に対して入力が

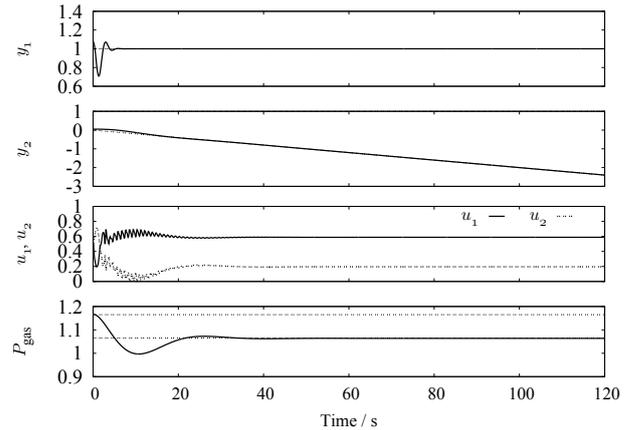
Fig. 7 Real parts of eigenvalues of \tilde{Q} for various Δp^{ref} Fig. 8 Relation between Δp^{ref} and the final value of P_{gas}

$u_i \in [0, 1]$ となり、かつ状態が $x \in X$ を満たせばよい。本論文では、これを踏まえた試行錯誤によりつぎの多項式に基づきゲインを設定した: $(s^2 + 2.5s + 2.5^2)(s + 2.5)$, $(s^2 + 0.25s + 0.25^2)(s + 0.25)$ 。Fig. 6において、共通の $P_{\text{e}\infty}^{\text{ref}}$ のもとで、異なる p^{ref} の設定に対して、 y_1 が同じ応答を示し、 y_2 については指定した p^{ref} へと収束している。これは、出力 y_1 および y_2 が非干渉化され、連系点電力の目標値への追従が可能であることを示している。

6.2 連系点電力およびガス使用量の同時調整

最後に、制御則 (30) の有効性を確認する。定理 2 の条件について、Fig. 4 の \circ は目標軌道のパラメータ Δp^{ref} を変化させた場合の結果を示す。ただし、 $y_1^{\text{ref}} = 1.0$ としている。計算結果より、 $\Delta p^{\text{ref}} \in [-0.068, 0.1]$ の範囲では定理 2 の点 $([P_{\text{e}\infty}^{\text{ref}}, 0, \dots, 0]^T, [0, \Delta p^{\text{ref}}, 0]^T, \eta^{\text{ref}})$ は開集合 D に含まれている。行列 \tilde{Q} の固有値に関しては、前述の結果と同様、実固有値の一つが -10 付近に存在し、他の固有値の実部は Fig. 7 に示す結果となった。図より $\Delta p^{\text{ref}} > 0.046$ の範囲で実部が正の固有値が存在することがわかる。したがって、 $y_1^{\text{ref}} = 1.0$ に対して定理 2 の条件は $\Delta p^{\text{ref}} \in [-0.068, 0.046]$ の範囲で成立する。上記の範囲の広さについて、Fig. 8 は Δp^{ref} と P_{gas} の最終値の関係を示している。図より P_{gas} は 0.7 から 1.4 の範囲で調整可能であり、上記の Δp^{ref} の範囲でガス使用量を数割程度変化させることができることがわかる。

Fig. 9 は $y_1^{\text{ref}} = 1.0$ および $\Delta p^{\text{ref}} = -0.02$ とした場合の閉ループ系の応答を示す。初期値および制御器のゲインは 6.1 のものと同じ値に設定した。連系点電力 y_1 およびボイラ圧力の y_2 のいずれも目標軌道に追従しており、ガス使用量が低下していることがわかる。上記の設定は数十分で圧力（絶対圧）が 1 割程度変化する勾配に相当しており、この間にガス使用量を 1 割程度抑制することができる。上記の結果は、本パラメータ設定において、前述した電気供給量を維持したうえでのガス使用量

Fig. 9 Time responses of output variables and gas flow under $P_{\text{e}\infty}^{\text{ref}} = 1.0$ and $\Delta p^{\text{ref}} = -0.02$

のピークの抑制が実現可能であることを示すものである。

7. おわりに

本論文では、2サイト地域エネルギーシステムの非線形状態方程式モデルに対して、連系点電力およびボイラ圧力の目標軌道を追従する制御系を設計した。入出力線形化を用いて上記の二つの出力を非干渉化することで、(i) 連系点電力の調整および (ii) 熱の需給バランスを考慮したガス使用量の調整の二つを分離して議論することが可能となった。本論文の主結果として、連系点電力に関して目標値への追従を行いつつ、ボイラ圧力に関してランプ状に変化する目標軌道への追従を行うことで、ガス使用量を一定目標値へと収束させる制御則を導出した。

本制御則を用いることで、熱供給システムがエネルギーの蓄積要素としてエネルギー需給の過不足を吸収し、地域外とのエネルギー授受に関する電気およびガスフローを調整することができる。これは、複数のエネルギー変換機器の協調による地域エネルギーマネジメントのベースとなる結果である。

最後に、地域エネルギーマネジメントのための制御系設計に関して本論文の課題を述べる。本論文で設定した目標軌道はランプ状に変化し、時間無限大では発散する。この変化は閉ループ系の時定数に比べて遅いため、電気およびガスフローの調整のための制御系設計に関しては実用上問題ない。しかし、長時間スケールではボイラ圧力の目標軌道の有界性を保証する必要がある。一方、圧力の有界性を確保するため、これを安定化した場合については文献 [25] で検討しており、エネルギーフローに関して目標値からの定常偏差が避けられないことがわかっている。電気、熱、ガスを考慮した長時間スケールを含む目標軌道の設計については今後の課題である。

また、本論文では、目標軌道を安定化するために、入出力線形化による極配置に基づくフィードバック則を検討した。これは、目標軌道の追従により電気およびガスフローを調整可能であることの理論的裏付けとなる。

しかしながら、実装の観点からは、モデル化誤差の影響を受けにくい制御系の設計が不可欠である。とくに、フィードバックによる非干渉化の場合には、一般に定常状態非干渉化や部分非干渉化が利用される [26]。このためのフィードバック則としては、線形化に基づく制御則に加え、入出力線形化に基づく非線形ロバスト（適応）制御 [24] が考えられ、実装に向けた検討課題である。

謝 辞

本研究は、JST, CREST(#JPMJCR15K3)の支援を受けたものである。

参 考 文 献

- [1] M. Geidl, G. Koeppl, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson and K. Fröhlich: Energy hubs for the future; *IEEE Power & Energy Magazine*, Vol. 5, No. 1, pp. 24–30 (2007)
- [2] M. O'Malley and B. Kroposki: Energy comes together: The integration of all systems; *IEEE Power & Energy Magazine*, Vol. 11, No. 5, pp. 18–23 (2013)
- [3] T. Shinji, T. Sekine, A. Akisawa, T. Kashiwagi, G. Fujita and M. Matsubara: Reduction of power fluctuation by distributed generation in micro grid; *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 163, No. 2, pp. 22–29 (2008)
- [4] 山崎, 小林, 野口, 牛島, 金子: ガスエンジンを利用した自然エネルギー電源の出力変動補償; 日本機械学会論文集B編, Vol. 79, No. 806, pp. 2138–2148 (2013)
- [5] S. Mueller, R. Tuth, D. Fischer, B. Wille-Hausmann and C. Wittwer: Balancing fluctuating renewable energy generation using cogeneration and heat pump systems; *Energy Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 83–89 (2014)
- [6] 野田, 関, 飯野: ビル群のエネルギー管理を実現する次世代のBEMS技術; 東芝レビュー, Vol. 67, No. 9, pp. 7–10 (2012)
- [7] M. Münster, P. E. Morthorst, H. V. Larsen, L. Bregnbæk, J. Werling, H. H. Lindboe and H. Ravn: The role of district heating in the future Danish energy system; *Energy*, Vol. 48, No. 1, pp. 47–55 (2012)
- [8] 小川, 石川, 横山, 進士, 渡部, 須澤: LFC調整容量確保のための地域冷暖房システムの最適な設備容量および運用; 平成25年電気学会全国大会論文集, pp. 123–124 (2013)
- [9] M. Arnold, R. R. Negenborn, G. Andersson and B. D. Schutter: Model-based predictive control applied to multi-carrier energy systems; *Proc. IEEE Power Energy Society General Meeting*, pp. 1–8 (2009)
- [10] G. K. H. Larsen, N. D. van Foreest and J. M. A. Scherpen: Distributed MPC applied to a network of households with micro-CHP and heat storage; *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 2106–2114 (2014)
- [11] A. Isidori: *Nonlinear Control Systems*, 3rd ed., Springer-Verlag (1995)
- [12] S. Sastry: *Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control*, Springer-Verlag (1999)
- [13] 星野, 薄, 引原: 2サイト地域電熱供給システムの安定性—熱融通指令値のステップ状変化に対する数値的検討; システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 11, pp. 452–460 (2014)
- [14] H. Hoshino, Y. Susuki and T. Hikiyara: A nonlinear dynamical model of two-sites electricity and heat supply system; *Proc. 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp. 482–485 (2014)
- [15] H. Hoshino and Y. Susuki: Graph-based modeling and analysis of dynamic flows in steam supply networks; *Proc. the 54th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1358–1363 (2015)
- [16] H. Hoshino, Y. Susuki and T. Hikiyara: A lumped-parameter model of multiscale dynamics in steam supply systems; *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 11, No. 6, 061018 (2016)
- [17] H. Hoshino, Y. Susuki, T. J. Koo and T. Hikiyara: A controller design of a two-site electricity and heat supply system; 第60回システム制御情報学会研究発表講演会, 141-4 (2016)
- [18] K. J. Åström and R. D. Bell: Drum-boiler dynamics; *Automatica*, Vol. 36, No. 3, pp. 363–378 (2000)
- [19] T. S. Kim, D. K. Lee and S. T. Ro: Dynamic behavior analysis of a heat recovery steam generator during start-up; *International Journal of Energy Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 137–149 (2000)
- [20] W. I. Rowen: Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines; *Journal of Engineering for Power*, Vol. 105, No. 4, pp. 865–869 (1983)
- [21] J. Machowski, J. W. Bialek and J. R. Bumby: *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd ed., John Wiley & Sons (2008)
- [22] A. J. Osadacz: *Simulation and Analysis of Gas Networks*, E. F. N. Spon (1987)
- [23] J. Bujak: Optimal control of energy losses in multi-boiler steam systems; *Energy*, Vol. 34, No. 9, pp. 1260–1270 (2009)
- [24] R. Sepulchre, M. Janković and P. Kokotović: *Constructive Nonlinear Control*, Springer-Verlag (1997)
- [25] 星野, 薄, T. J. Koo, 引原: 2サイト電熱供給システムにおけるエネルギーフローの追従制御に関する一検討; 第59回自動制御連合講演会, SaA2-4 (2016)
- [26] 橋本, 長谷部, 加納: プロセス制御工学, 朝倉書店 (2002)

著者略歴

ほし
星 野ひかる
光 (学生会員)

2014年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了, 同年4月同大学大学院博士後期課程に進学し, 現在(2017年2月)に至る. 2017年3月同課程所定の研究指導認定見込. 電力・エネルギーシステムの研究に従事. 2015年度システム制御情報学会 学会賞論文賞受賞, 電子情報通信学会, 日本機械学会の学生会員.

すすき
薄よし ひこ
良 彦 (正会員)

2005年3月京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 同年4月同大学院助手, 2011年10月同講師を経て, 2016年4月大阪府立大学工学研究科電気・情報系専攻電気情報システム工学分野准教授となり現在に至る. 2008年4月より2年間, 米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員. 応用非線形ダイナミクス, 電力・エネルギー技術, 制御応用などの研究に従事. 京都大学博士(工学). 2009年度, 2015年度システム制御情報学会 学会賞論文賞, 2012年度エヌエフ基金研究開発奨励賞などを受賞. 計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 電気学会, IEEE, SIAMなどの会員.

T. John Koo



Koo is Director of Cyber-Physical Systems, Hong Kong Applied Science and Technology Research Institute (ASTRI). He received the Ph.D. degree in Electrical Engineering, University of California at Berkeley, USA, in 2000. Koo was Professor of the Chinese Academy of Sciences, China, in 2009-2013. Koo was Visiting Professor in INRIA, France and in ETH Zurich, Switzerland. Koo received the US National Science Foundation CAREER Award in 2005 and Distinguished Young Scientist Award of Scientific Chinese, the China Association for Science & Technology in 2012. He is a Senior Member of IEEE and a Member of ACM and Sigma Xi.

ひき ぼら
引 原 隆 士 (正会員)

1987年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程研究指導認定退学. 関西大学を経て, 1997年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻助教授, 2001年8月同教授. 主として, 非線形力学およびその工学的応用, MEMS, パワーエレクトロニクス, 電気エネルギーシステムに関する研究に従事. 京都大学工学博士. 電子情報通信学会フェロー. 電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ会長などを歴任. 2015年電子情報通信学会 論文賞(喜安善市賞)受賞. 2009, 2013, 2015年システム制御情報学会論文賞受賞. 電気学会, 電子情報通信学会, IEEE, SIAM, APSの会員.