

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561034

研究課題名(和文) SOFC - ガスタービンハイブリッドシステムのダイナミクスと制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on dynamics and control of SOFC-gas turbine hybrid system

研究代表者

君島 真仁 (Kimijima, Shinji)

芝浦工業大学・システム工学部・教授

研究者番号：10298143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000 円、(間接経費) 1,260,000 円

研究成果の概要(和文)：固体酸化物形燃料電池(SOFC)とガスタービンを組み合わせたハイブリッド発電システムのダイナミクスに着目し、負荷変動時などの動的挙動を予測しうる動特性解析モデルを構築し、制御系を含むシステム設計について研究を展開した。SOFCの動特性解析モデルを構築し、負荷変動追従運転を行うための出力制御の方法を提案することができた。出力300Wクラスのセルスタックを使用し、提案した制御方法の妥当性を実験的に確認することができた。

研究成果の概要(英文)：The topic of this research project was the dynamic characteristics of a solid-oxide fuel cell (SOFC)-gas turbine hybrid power generation system. In order to predict the transient response to load change, the numerical calculation code for the dynamic characteristics evaluation of the SOFC power generation module, which consists of tubular cells and a reformer, was developed. The dynamic behavior of the SOFC with control units was clarified by using the developed calculation code. The adequate control scheme for the load following operation was proposed, and it was validated qualitatively through the measurement of the transient response of a 300kW SOFC power generation module.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：エネルギーシステム 固体酸化物形燃料電池 ガスタービン

1. 研究開始当初の背景

新興諸国におけるエネルギー需要の急増や環境保全のための制約の下での産業競争力の強化など、我が国のエネルギーをめぐる様々な事象には解決しなければならない多くの課題がある。エネルギー・環境・経済にまたがる課題を克服し、持続可能な社会への移行を可能にするためには、上流側の一次エネルギー供給端から下流側の需要端にいたるまでのエネルギー変換のプロセスで発生する損失を最小限に抑制することが求められる。従来の大規模システムによる電力供給の一層の効率向上は重要な課題であるが、需要端に近いところで電気と熱を併給し、総合的なエネルギー利用効率の向上に資する分散エネルギーシステムの導入が有効なオプションである。

分散エネルギーシステムは発電にともなって発生する熱を有効に利用することによりエネルギー資源消費量を削減することに利点を有するため、システムの特性と需要端のエネルギー利用の形態に不整合を生じないようなシステム設計と運用が求められる。そのため、需要端の特性に応じたケーススタディを行う必要が生じ、省エネルギー性の評価が難しく普及の障害の一つとなっている。この障害を克服するには、エクセルギー率の高い電力への変換効率を高めることが求められるが、従来の小型内燃機関によるシステムでは、大幅な発電効率の向上を望むことはできない。このような状況の中で、小型でありながら高い発電効率の達成を期待できるエネルギー変換システムとして固体酸化物形燃料電池 (SOFC) への期待が高まりつつある。現在、家庭用をターゲットとした 1kW 級の発電モジュールの実用に向けた研究開発が成果を上げつつあり、50%(LHV) の発電効率の達成が射程内に収まりつつある。より一層の発電効率の向上を期待しうるシステムとして SOFC とガスタービンによるハイブリッドシステムがあり、欧州や米国では国家的なプロジェクトにおいて実用に向けた活発な研究開発が展開されている。

本研究では、SOFC-ガスタービンハイブリッドシステムを対象とする。SOFC は 650~1000 程度の高温度作動であり、高温排熱の動力化による効率向上や内部改質によるシンプルな構成などの体系的な利点を有することに大きな特長がある。また、小型化に伴う性能低下やコスト増大の問題が、熱機関単独の場合と比較すると小さいので、ハイブリッドシステムは本質的に小型分散エネルギーシステムに適した発電システムであるといえる。発電効率については、現段階で天然ガスなどの化石燃料を用いた発電システムの中で最も高く、熱力学的なサイクル解析の結果によれば、発電効率 60~70% (LHV) が原理的に可能である。これは現代の最新鋭コンバインドサイクルの発電効率を凌駕するものであり、近い将来に実用化し幅広い容

量範囲への適用が望まれている。今後その研究開発を強力かつ重点的に推進すべきテーマであるといえる。

近年、欧米や韓国で国家プロジェクトとして数百 kW 級のハイブリッドシステムの開発ならびに実証評価が進められている。しかし、それら他国における研究開発事例を見ても、必ずしも電気化学反応や熱流動などの局所的現象からシステムとしてのマクロなダイナミクスまでを統合的に検討しているとはいえない。これまで主として電解質および電極を中心とする材料開発が進められてきた SOFC と独自に発展を遂げ技術的に成熟してきたガスタービンとを組合せ、ハイブリッドシステムとして統合化する最適設計手法を確立することは極めて重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、図 1 に示すような構成の SOFC-ガスタービンハイブリッドシステムを対象とし、これまでの我が国における燃料電池研究において十分な検討が行われてこなかったシステムダイナミクスと制御の問題に注目している。制御系を含むハイブリッドシステムの合理的な設計手法の確立に資する解析ツールの構築に向けて、モデリングを中心とした研究を進める。具体的には、次のようなテーマを採り上げる。

(1) SOFC の動特性解析モデルの構築

これまでに発表されている SOFC 材料の基礎研究の成果から電極と電解質の物理的・化学的特性に関する情報を取り入れ、電気化学反応と熱・物質移動との複合現象を含む動特性解析モデルを構築する。発電性能ならびにダイナミクスに対して支配的な因子を見極め、実特性を模擬しうる範囲で出来る限りシンプルで理解しやすい動特性解析モデルとして仕上げる。

(2) ガスタービンの動特性解析モデルの構築

小型のラジアル圧縮機とタービンで構成されるガスタービンの動特性解析モデルを構築する。ガスタービンのダイナミクスには、

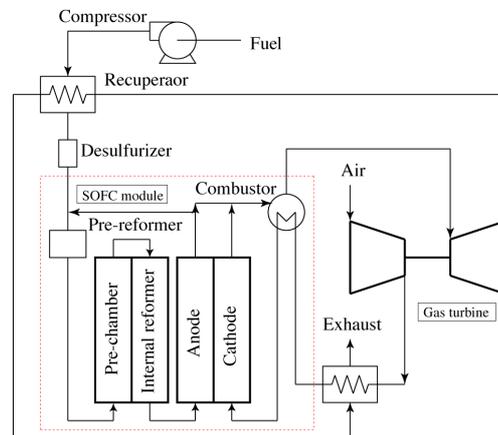


図 1 ハイブリッドシステムの構成

回転要素の慣性モーメントが大きく影響することから、熱力学的な解析と回転系の設計問題の両面から検討を行う。

(3) SOFC とガスタービンのカップリングによるハイブリッドシステムの動特性解析モデルの構築

(1)と(2)のテーマで得られたモデルを組み合わせることによりハイブリッドシステムの動特性解析モデルを構築する。負荷変動時などの運転に対応するためには適切な制御系を付帯することが必須であるため、出力制御や温度制御、流量制御などの制御系のモデルを組み込む。

3. 研究の方法

本研究では分散エネルギーシステムを想定して出力 200kW クラスのハイブリッドシステムを対象とする。SOFC とガスタービン、再生熱交換器の動特性解析モデルをそれぞれ作成した上で、それらを接続することによりハイブリッドシステム全体の動特性解析モデルを構築し、そのシミュレーションコードを完成させる。手順は以下の通りである。(1)システム全体の体格などを決定するための設計計算を行い、SOFC、ガスタービンなどの仕様を確定する。その上で、SOFC とガスタービンの動特性解析モデルの作成に取り組む。

(2) SOFC の制御系の検討、ガスタービンの作動特性についての検討を進め、並行して再生熱交換器の動特性解析モデルを作成する。

(3) SOFC、ガスタービン、再生熱交換器の動特性解析モデルを組合せ、ハイブリッドシステムの動特性解析モデルを構築し、システムのダイナミクスについて検討し、システム設計の指針をまとめる。

4. 研究成果

(1) SOFC の動特性モデルの構築

本研究で対象とする SOFC のセルは円筒形状とし、図 2 に示すようにセルスタックと改質器を組み合わせた SOFC 発電モジュールをモデリングの対象とした。

本研究では、セルスタックを単セルとして長手方向へ 1 次元で取り扱うことで、簡易的な解析モデルとした。解析対象領域は図 2 右に示した区域が対象であり、ここで物質収支

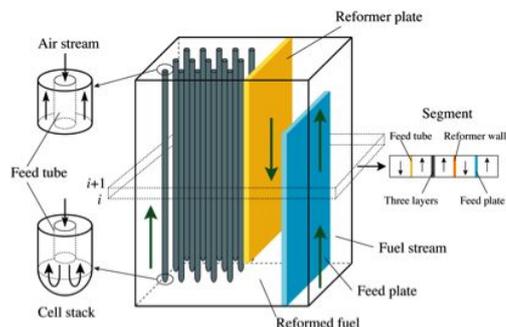
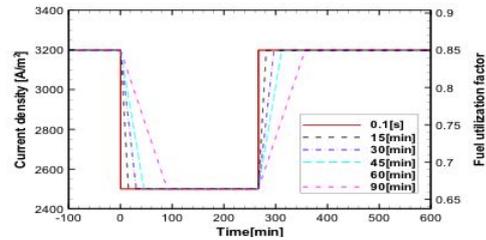


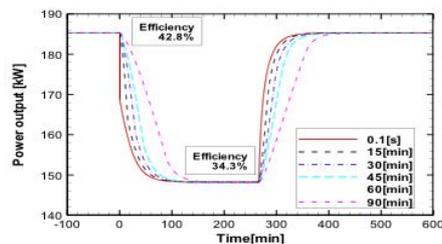
図 2 SOFC 発電モジュールの構成

と伝熱による輸送現象を含めた非定常熱収支を解くこととした。

解析結果の一例として電流操作時の出力の応答を図 3 に示す。電流の操作に追従して出力が変化するが、セル温度の緩慢な応答に合わせて電圧が変化するため、その影響により出力の応答に遅れが生じる（この例では 100 分程度の遅れが発生）。このことは、セル温度を適切に制御できれば、出力応答を改善できることを示唆している。



(a) 電流値の操作方法



(b) 出力の過渡応答

図 3 電流操作時の SOFC 出力の応答

(2) SOFC の出力制御方法の提案

フィードバック制御の下での出力応答の解析結果から、調整器に入力される偏差をもとに電流を操作することで、良好な負荷追従が可能であるとの見通しを得ることができた。しかし、熱容量に起因する遅れを有する温度変化とそれに応じたセル性能の変化が予想されるため、負荷変動に伴う作動温度変動の抑制のための空気流量操作、出力に見合った燃料の供給が望まれる。さらに、燃料の供給量を操作する場合には、水蒸気の不足による改質プロセスでの炭素析出を回避しなければならないため、適正量の水蒸気の供給を維持しなければならない。

そこで本研究では、図 4 に示すような、出力、作動温度、燃料利用率（消費される燃料と供給される燃料のモル比）、S/C（供給される燃料と水蒸気のモル比）の 4 つの量を制御量とするフィードバック制御系を付帯する SOFC を対象とし、出力の目標値変化に対する過渡応答の数値解析を行い、提案した制御方法が、負荷変動追従性を高める上で有効であるか否かについて検討を行った。

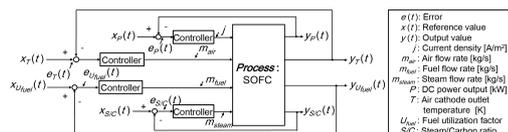


図 4 SOFC のフィードバック制御系

図5は出力の目標値を定格負荷の100%から部分負荷の80%までステップ状に変化させたときの出力の応答を示している。この図から出力が0.5分(30秒)程度で目標値に収束していることがわかる。このように、制御パラメータを適切に設定することで、負荷変動への追従が可能であり、一日を通じて負荷変動が生じるような分散電源としてSOFCの利用が可能であることを示すことができた。

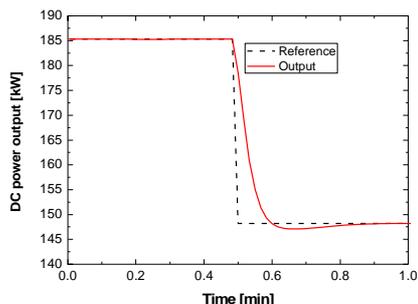


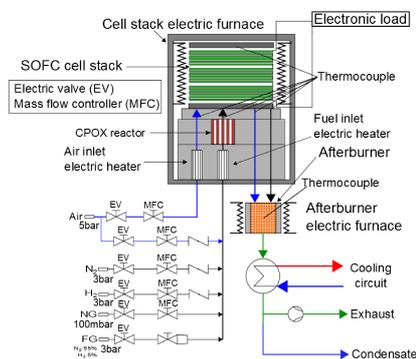
図5 負荷変動時の出力の過渡応答

(3) SOFCのダイナミクスに関する実験

本研究の開始後に、研究代表者が以前から研究交流を行っているポーランドアカデミー科学技術大学(AGH University of Science & Technology)のJanusz Szmyd教授と共同でSOFCのダイナミクスに関する実験研究を行う機会を得ることができた。この実験を通じ



(a) 装置の外観



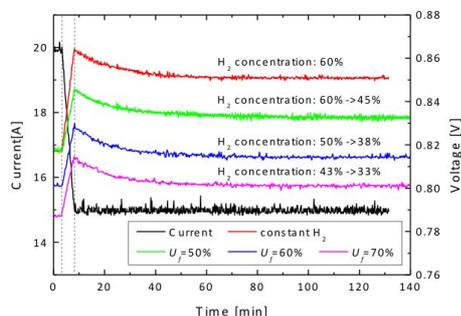
(b) システム構成

図6 SOFCの動特性実験の装置

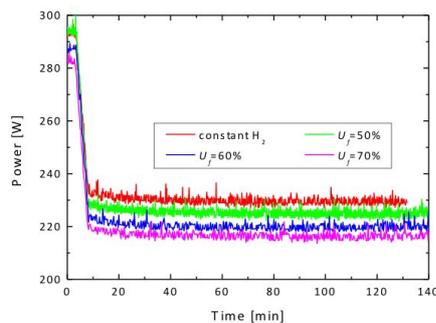
て、定性的な側面からではあるが、本研究で構築した動特性モデルの検証のための基礎的な実機データを取得することができた。

対象としたシステムは図6に示す通りであり、平板型セルを使用した出力300W級の発電モジュールである。これを使用して電流操作時の過渡特性についての実験を行った結果、図7に示すような結果が得られ、電流を操作することで十分に出力制御が可能であることを実証することができた。

SOFCの実システムは国内外のメーカーにより開発が進められているが、発電特性のデータが開示されている例は極めて少ないことから、本研究を通じて公表することができたデータは、今後のSOFCシステムの研究、とくに数値解析的なアプローチにおいては、解析の妥当性の裏付けを得るためのデータとして高い価値を有すると考えられる。



(a) 電流の操作と電圧の過渡応答



(b) 出力の過渡応答

図7 300W級SOFCの動特性

(4) ガスタービンの動特性モデルの構築

ガスタービンの基本的な作動条件を決定し、それに基づいて構成要素(圧縮機、燃焼器、タービン、再生熱交換器)の概念設計を行うことができた。それにもとづいて構成要素についての物質収支式と非定常のエネルギー方程式により構成される動特性モデルを構築し、解析コードを作成した。これらを連結したガスタービン全体の動特性モデルについては十分な検討が行うことができなかった。全体の解析コードが未完成となってしまったことは大きな反省点である。

(5) ハイブリッドシステムの動特性モデル

研究期間内にガスタービンの解析コードを完成させることができなかったことから、本研究の当初の目的であるハイブリッドシステムの動特性モデルの構築については十分な検討を行うことができなかった。しかし、研究期間終了後も継続して取り組んでおり、本研究を通じて得ることのできた知見を生かし、できるかぎり早期に研究成果を発信したいと考えている。

一方で、当初の計画にはなかったが、幸運にも SOFC 実機の動特性実験を行う機会に恵まれ、従来発表されている例が極めて少ない、SOFC の負荷変動に対する過渡応答の実験データを得ることができ、研究成果の一つとして発表できたことは大きな収穫であったと考えている。SOFC-ガスタービンハイブリッドシステムのダイナミクスに関する研究の今後の展開の中で活用していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Y. Komatsu, G. Brus, S. Kimijima, J. S. Szmyd, The effect of overpotentials on the transient response of the 300 W SOFC cell stack voltage, *Applied Energy*, 115 (2014), 352-359. (査読有)

Y. Komatsu, S. Kimijima, J. S. Szmyd, Numerical analysis on dynamic behavior of solid oxide fuel cell with power output control scheme, *Journal of Power Sources*, 223 (2013), 232-245. (査読有)

Y. Komatsu, G. Brus, S. Kimijima, J. S. Szmyd, Experimental study on the 300W class planar type solid oxide fuel cell stack: Investigation for appropriate fuel provision control and the transient capability of the cell performance, *Journal of Physics: Conference Series*, 395 (2012), art. no. 012162. (査読有)
doi:10.1088/1742-6596/395/1/012162.

〔学会発表〕(計9件)

Y. Komatsu, G. Brus, S. Kimijima, J. S. Szmyd, Experimental study on transient characterizations of 300 W solid oxide fuel cell stack during load change, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ExHFT-8), Lisbon (Portugal), Proceedings of 8th World Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (2013/06/16-20) 6e.3.

Y. Komatsu, G. Brus, S. Kimijima, J. S. Szmyd, Experimental study on the 300W class planar type solid oxide fuel cell stack: Investigation for appropriate fuel provision control and the transient capability of the cell performance, 6th European Thermal Sciences Conference EURO THERM2012, Poitiers (France), Proceedings of 6th European Thermal Sciences Conference Eurotherm, 2012/09/04, A3486YK.

Y. Komatsu, S. Kimijima and J. S. Szmyd, Numerical Analysis on Dynamic Behavior of a Solid Oxide Fuel Cell with a Power Output Control Scheme, 10th Euroean SOFC Forum, Lucern (Switzerland), 2012/06/27, Chapter 17 pp. 159-168.

Y. Komatsu, S. Kimijima and J. Szmyd, Numerical Analysis on the Dynamic Behavior of a Solid Oxide Fuel Cell with a Multivariable Control Strategy, Proc. 12th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, Montreal (Canada), 2011/05/05, ECS Transactions 35(1), pp. 1045-1054, doi: 10.1149/1.3570085.

小松洋介・君島真仁, 出力制御系を付帯する固体酸化物形燃料電池の動特性解析(負荷変動追従運転時の燃料不足状態の発生について考察), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, 157-158 (2011 年 10 月 29 日, 浜松)

小松洋介・君島真仁, 出力制御系を付帯する固体酸化物形燃料電池の動特性解析, 日本機械学会動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 157-160 (2011 年 6 月 23 日, 東京)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

君島 真仁 (KIMIJIMA, Shinji)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号: 10298143