

MATLAB で作成した QE に基づく 設計支援ツール

(株) アルファオメガ 兵頭 礼子 (Noriko Hyodo)
AlphaOmega Inc.
(株) 富士通研究所 / 九州大学 穴井 宏和 (Hirokazu Anai)
FUJITSU LABORATORIES LTD. / Kyushu University

1 始めに

これまで、数値計算ツールである MATLAB を利用して、数式処理のアルゴリズムを用いたロバスト制御系の設計支援ツールを開発してきた。このツールでは、制御系設計の諸問題を SDC (Sign Definite Condition) とよばれる比較的簡単な制約式に変換できることを利用し、これに特化した Quantifier Elimination (限定子消去法、以下、QE) を用いることで、効率的に制御系設計問題を解決する。QE を用いることにより、パラメトリックな取り扱いが可能となるだけでなく、非凸な制約問題に帰着される制御系設計問題も正確に解くことができる。

ここでは、ツールの紹介と、パラメトリック最適化手法を用いて、発電機の励磁制御系設計問題への応用と、設計支援ツールの作成、シミュレーション結果の報告を行う。

2 Parametric robust control ツールボックス

Parametric robust control ツールボックス (以下、PRC ツールボックス) は、制御系設計の現場において頻繁に用いられる構造の固定された制御器 (fixed-structure controller) を用いた設計作業を支援するツールである。このツールは、設計仕様を満たす制御器のパラメータの決定を数式処理を用いることで行う。このことにより、与えられた設計仕様が非凸な制約問題に帰着された場合も同様に扱うことができ、制御器のパラメータの可能領域を semi-algebraic set で表された領域として求めることができることが特長であり、数値計算だけによる設計では、困難であった設計の問題を解くことが可能である。また、数値計算による設計では、複数の設計仕様を同時に適用する多目的設計問題を扱うことは困難であったが、PRC ツールボックスでは、多目的設計問題も容易に計算可能である。また、このツールは、全ての作業を GUI 上で行うことが可能である。

2.1 基本構成

PRC ツールボックスは、パラメタや仕様を設定したり、演算結果や変数の値を入力／表示する基本ウインドウ (図 1(1))、システムの仕様を GUI 上で設定する制御仕様ウインドウ (図 1(2)、基本ウインドウの [Windows] 項目、[Param] ボタン押下で表示)、システムの開ループ系の挙動を表示する開ループ系ウインドウ (図 1(3))、選択された仕様を満たすパラメタ領域を表示するパラメタ領域ウインドウ (図 1(4)、基本ウインドウの [Windows] 項目、[DNF] ボタン押下で表示) から構成される。

2.2 基本機能

基本的な使用法は以下の通りである。

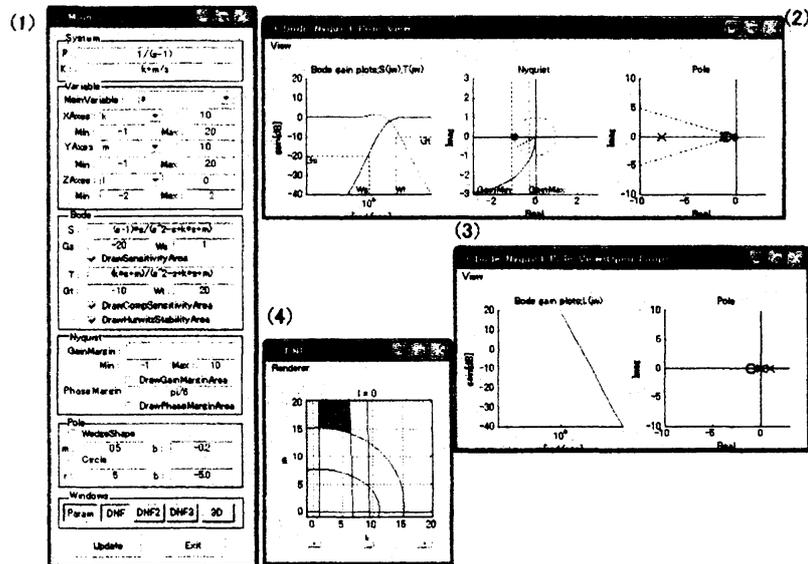


図 1: Parametric robust control ツールボックス

1. 基本ウインドウの [Windows] ボタンで表示させたい図のボタンを押下
2. 基本ウインドウの [System] 項目に、プラント、コントローラの伝達関数を入力
3. 適用したい制御仕様のチェックボックスにチェックを入れ、仕様を設定
(仕様の設定に関しては、基本ウインドウのエディットボックスに直接入力するか、制御仕様ウインドウ上でグラフィックオブジェクトを操作することで設定可能)
4. 基本ウインドウの [Update] ボタンを押下

基本ウインドウの [Update] ボタンを押下すると、指定した設計仕様に対する実行可能なパラメタの領域がパラメタ空間中に描画され、仕様を満たす領域が着色によって

表示される。複数の仕様を選択した場合は、それぞれの条件を満たす領域の重ね合わせが表示される。図1に表示されているのは、感度関数、相補感度関数、Hurwitz 安定性の3条件の重ね合わせである。PRC ツールボックスに実装されている適用可能な制御仕様は、感度関数、相補感度関数(共に H_∞ ノルム)、Hurwitz 安定性、Gain/Phase マージン、Pole Location(Wedge Shape) である。

また、基本ウインドウのパラメータ入力欄に数値を入力、またはパラメータ領域ウインドウ上をマウスでクリック・ドラッグすることによって、パラメータの値が制御仕様ウインドウに反映され、パラメータ領域上のある点におけるシステムの特性を確認することが可能である。

また、実際の制御系設計問題では、2変数以上の変数を扱うことも多い。PRC ツールボックスでは、PID コントローラのような3つのパラメータ変数をもつ場合に、パラメータの実行可能領域の3D 表示と、切断面での2D 表示で可視化する(図2)。PRC ツールボックスでは、パラメータ変数は m, k, l とする。この機能は、PRC ツールボックスの基本ウインドウで、[3D] ボタンを押下することで使用可能である。

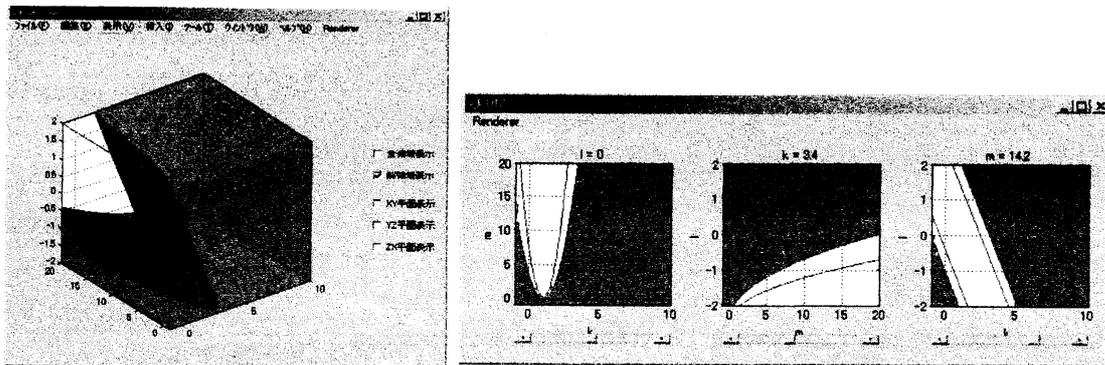


図 2: 3D 解領域表示

3D 表示ウインドウには、全領域表示、解領域表示、XY 平面表示、YZ 平面表示、ZX 平面表示のチェックボックスを持つ。図2は、解領域表示の例である。XY 平面表示、YZ 平面表示、ZX 平面表示では、各平面で解領域を切断した面が表示され、この断面がパラメータ領域ウインドウと連動しており、パラメータ領域ウインドウの各図下部のスライダバーを動かすことにより3D 解領域の断面を移動させることが可能である。

3 多目的設計への応用

今回、多目的設計への応用として、発電所で使用される発電機の励磁制御系設計問題に適用した。励磁制御方式のパラメータ調整法として、数式処理的手法に基づく発電機励磁制御系設計を行う方法である。

近年、様々な現代制御理論を用いた励磁制御方法が生まれてきたが、従来の定数設計方法より複雑であること、また、導入実績がないことから、故障時のトラブルに対応できない等の理由により、実システムではほとんど実用化されていない。そのため、実機試験

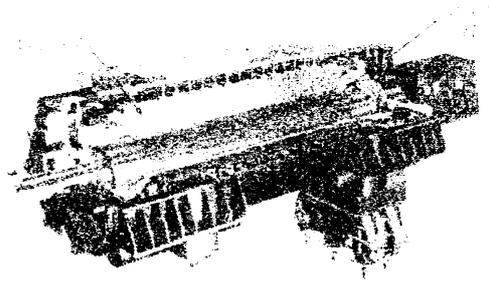


図 3: タービン駆動発電機の断面図

においては、現在でも Bode 線図での繰り返し計算による感度調整が現在でも活用されることが多い。しかし、この感度調整作業は現場の技術者の経験に依存する部分も多く非常に手間がかかる。そこで、周波数領域におけるいくつかの設計仕様を与え、それぞれの仕様に対する設計パラメータ可能領域を求め、それらを重ね合わせることで実行可能なパラメータ領域を導き出すパラメータ空間法に基づく方法を提案する。PRC ツールボックスをベースに、パラメータ空間法に基づく設計支援ツールを開発し、PI 制御型の自動電圧調整器のブラシレス励磁方式、サイリスタ励磁方式の感度調整を検討する。

3.1 発電機の励磁制御系設計

発電機は、電力系統に有効電力・無効電力を出力する電気子巻線と、高速回線することで界磁磁束を発生させることにより発電機出力電圧を発生させる回転子から構成されている。図 3 は、タービン駆動発電機の断面である。発電機の回転子に流す直流電流の制御のことを発電機励磁制御、励磁制御を行う励磁装置のことを自動電圧調整器 (Auto Voltage Regulator、以降、AVR) と呼ぶ。

発電機の出電圧は、回転速度と励磁量に比例するため、励磁量を制御することによって、発電電圧を制御することが可能である。ここでは AVR としてよく用いられるブラシレス励磁制御方式、サイリスタ励磁制御方式について検討する。

3.2 ツールの作成と計算結果

まず、ブラシレス励磁制御方式、サイリスタ励磁制御方式ともに、計算に必要な定数を入力するツールを作成した (図 6,7)。ここで入力された定数を用いて制御対象となる系の伝達関数を求める。この伝達関数に含まれている比例ゲイン k 、積分ゲイン m の混合感度制約に対する実行可能領域を QE を用いた方法で求め、描画する。ここで考える混合感度制約は、

$$\|S(s)\|_{[0, \omega_s]} < \gamma_s, \quad (1)$$

$$\|T(s)\|_{[\omega_t, \infty]} < \gamma_t, \quad (2)$$

ここで

$$S(s) = \frac{1}{1 + P(s)C(s)}, \tag{3}$$

$$T(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)}. \tag{4}$$

となる感度関数 (1)、相補感度関数 (2) の周波数制約、Hurwitz 安定性の 3 つである。

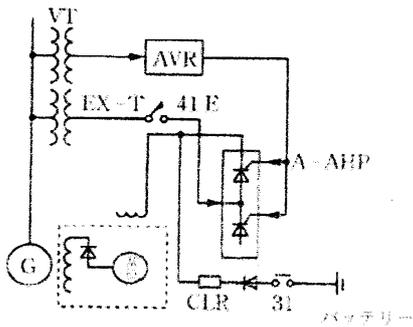


図 4: ブラシレス励磁制御方式

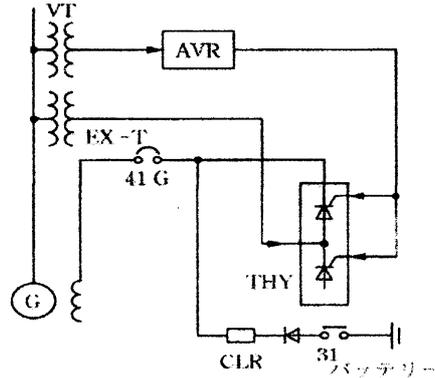


図 5: サイリスタ励磁制御方式

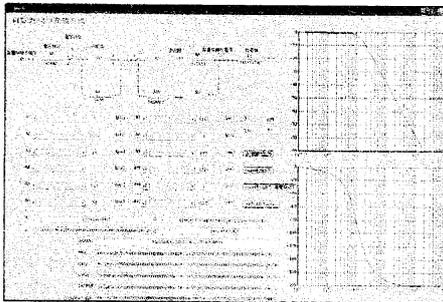


図 6: ブラシレス励磁制御方式定数入力画面

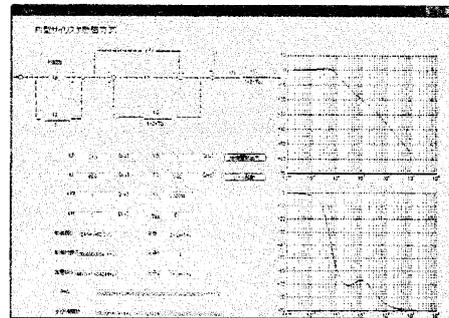


図 7: サイリスタ励磁制御方式定数入力画面

ブラシレス励磁制御方式に適用した際の計算結果を図 8 に、サイリスタ励磁制御方式に適用した際の計算結果を図 9 に示す。着色で描画された領域が指定したノルム制約条件を満たす比例ゲイン k と積分ゲイン m の実行可能領域である。この実行可能領域とナイキスト線図、極配置から AVR の感度調整を行い、その際の比例ゲイン k 、積分ゲイン m の値を用いてシミュレーションを行う。

4 シミュレーション結果

ブラシレス励磁制御方式、サイリスタ励磁制御方式で従来の Bode 線図を用いた方法で求めた値を用いた場合と、図 8、9 の実行可能領域内から感度調整を行って得られた

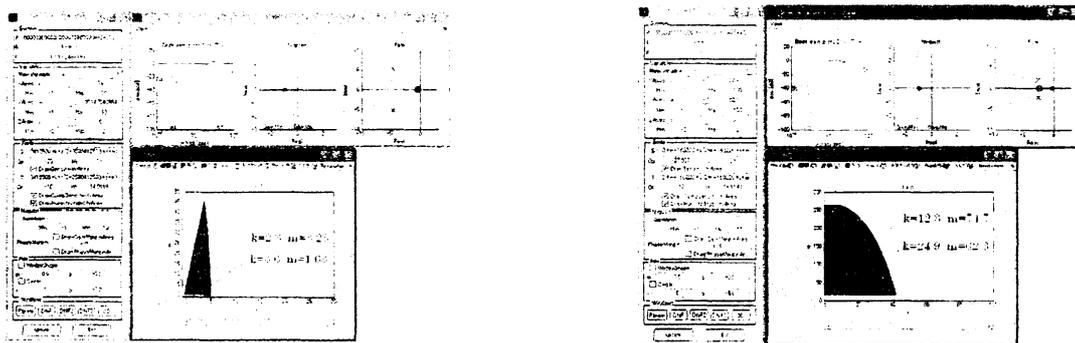


図 8: ブラシレス励磁制御サポートツール 画面
 図 9: サイリスタ励磁制御サポートツール 画面

表 1: 各ケースにおけるシミュレーション条件

	励磁制御方式	比例ゲイン k	積分ゲイン m
ケース 1	ブラシレス	2.3	3.23
ケース 2	ブラシレス	3.6	1.63
ケース 3	サイリスタ	12.3	74.7
ケース 4	サイリスタ	24.9	62.3

比例ゲイン k 、積分ゲイン m の値を用いた場合における $\pm 5\%$ 負荷インディシャル応答のシミュレーションを行った。ブラシレス励磁制御方式で従来の方法で求めた値を用いた場合をケース 1、図 8 の領域から感度調整を行った場合をケース 2、サイリスタ励磁制御方式で従来の方法で求めた値を用いた場合をケース 3、図 9 の領域から感度調整を行った場合をケース 4 とする。各ケースで用いた比例ゲイン k と積分ゲイン m の値を表 1 に、またそれぞれのケースにおけるシミュレーション結果を図 10、11、12、13 に示す。

シミュレーション結果の比較により、ブラシレス励磁制御方式、サイリスタ励磁制御方式ともに端子電圧のオーバーシュートのダンピングが改善されていることがわかる。

また、これらシミュレーションに用いた値を選ぶ際にも、実行可能領域の中からナイキスト線図、極配置の状態を確かめながら値を選択することが出来たため、見通しよく作業が行うことが可能となり、設計を有効にサポートすることが可能となった。

5 謝辞

第 3 章、第 4 章は、成蹊大学の吉村秀太氏、壹岐浩幸氏、瓜生芳久教授との共同研究により得られた結果です。改めて上記三氏のご協力に厚く御礼申し上げます。

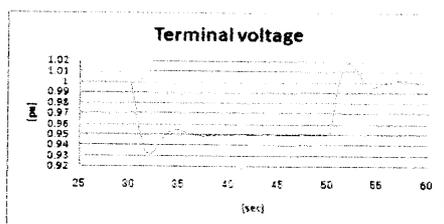


図 10: 端子電圧 (ケース 1)

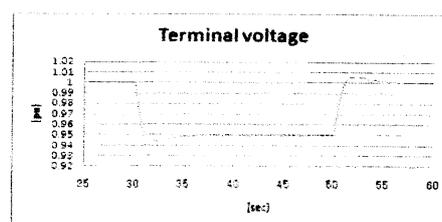


図 11: 端子電圧 (ケース 2)

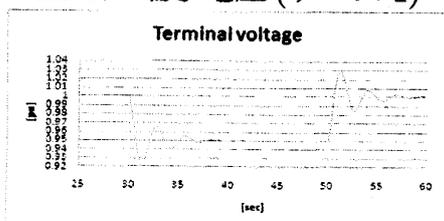


図 12: 端子電圧 (ケース 3)

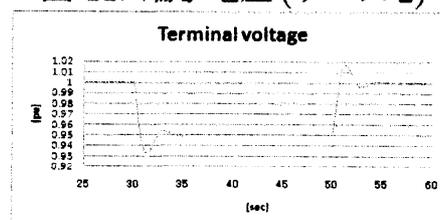


図 13: 端子電圧 (ケース 4)

参考文献

- [1] 近藤 良, 原 辰次, 金子 卓司. パラメータ空間設計による H_{∞} 制御計測自動制御学会 論文集, 27(6):714-716, 1991.
- [2] T.Kimura and S.Hara. A Robust Control System Design by a Parameter Space Approach Based on Sign Definite Condition. *In Proceedings of Korean Automatic Control Conference(KACC)*, pp. 1533-1538, 1991.
- [3] 足立 修一. MATLABによる 制御工学. 東京電機大学出版局, 1999.
- [4] 坂部 啓, 屋並 仁史, 穴井 宏和, 原 辰次. A MATLAB Toolbox for Parametric Robust Control System Design based on symbolic computation. 講究録 1395 「Computer Algebra - Design of Algorithms, Implementations and Applications, 2003」, pp. 231-237. 京都大学数理解析研究所, 2004.
- [5] Noriko Hyodo, Myunghoon Hong, Hitoshi Yanami, Shinji Hara and Hirokazu Anai. Solving and visualizing nonlinear parametric constraints in control based on quantifier elimination — A MATLAB toolbox for parametric control system design. *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing, Volume 18, Number 6*, pp. 497-512, 2007 (Springer Berlin / Heidelberg).
- [6] 吉村秀太, 壹岐浩幸, 瓜生芳久, 穴井宏和, 兵頭礼子. 発電機励磁制御方式を対象としたパラメータ空間法による設計平成 19年電気学会全国大会講演論文集, pp 486-487.