



# 電気－機械エネルギー変換系の計算機援用解析と設計に関する研究

黒江, 康明

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1982-03-31

(Date of Publication)

2009-11-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0353

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000353>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍) <sup>くろ</sup>黒 <sup>え</sup>江 <sup>やす</sup>康 <sup>あき</sup>明 (岡山県)  
学位の種類 学 術 博 士  
学位記番号 学博い第1号  
学位授与の要件 学位規則第5条第1項該当  
学位授与の日付 昭和57年3月31日  
学位論文題目 電気-機械エネルギー変換系の計算機援用解析と設計  
に関する研究

審 査 委 員 教授 丸 橋 徹  
教授 角 田 美 弘 教授 平 井 一 正

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、近年著しい発展を遂げているパワーエレクトロニクスの諸分野のうち、その中心的役割を果たしている、サイリスタ・ダイオードなど電力用半導体素子を含む電力変換回路すなわちサイリスタ回路と、それを含む電気-機械エネルギー変換系の計算機援用による解析および設計法に関する研究の成果をまとめたものである。電動機の駆動・制御など電気-機械エネルギー変換の技術は、サイリスタ・ダイオードなど電力用半導体の誕生以来飛躍的に進歩し、それに伴いそれらシステムの汎用性のある解析法および設計法の確立が強く望まれている。ところが、電気-機械エネルギー変換系においては、(1)このシステムは電気系、機械系あるいはそれらを制御する制御系などの物理的に異なったシステムが、電気系と機械系はエネルギーを媒体として、また電気系あるいは機械系と制御系は情報を媒体として結合したシステムであるので、これらを統一的に取り扱うのが困難である、(2)電気系すなわちサイリスタ回路は非線形スイッチ回路で、そのオンオフは回路の状態および制御信号に依存し、それに伴うモードを一般に解析的に予想するのが困難である、(3)エネルギー変換そのものが非線形特性である、など問題点が多く、現在のところ汎用性のある解析、設計法は存在しないようである。

一方、最近の計算機技術の発展により、各方面で計算機の導入が盛んになり、計算機を援用したシステムの設計が行われるようになり、各種の解析、設計のためのアルゴリズムも開発されているようである。そこで、本論文では、このような状況を踏まえサイリスタ回路およびそれを含む電気-機械エネルギー変換系の解析、設計においては、上記問題点を克服するために計算機の導入が不可欠でかつ最も適切な方法であると考え、計算機を援用した汎用性のある解析法・設計法を確立し、またそ

れに基づいて汎用性のあるアルゴリズム、プログラムパッケージを開発することを目的としている。論文の全体は8章から構成され、内容を大別すると、主として過渡状態の解析をめざしたシミュレーション法およびその高効率化、定常状態の解析法、パラメータ感度の計算法とその応用に分けられる。

第1章は結論で、先に述べたような本研究の目的およびその背景を明らかにした。

第2章では、本研究で対象としているサイリスタ回路およびそれを含む電気-機械エネルギー変換系の構成を示し、またそれらのモデルを計算機援用による解析、設計という立場で導出した。さらに、電気-機械エネルギー変換系を回路グラフとしてモデル化する方法を提案した。このモデル化の方法によると、電気-機械エネルギー変換系を、電気系、機械系と区別することなく統一的に取り扱うことができ、さらに電子回路で広く行われているテレゲンの定理に基づく感度解析法を電気-機械エネルギー変換系に導入することができ非常に有効である。

第3章では、サイリスタ回路を含む電気-機械エネルギー変換系に対して汎用性のあるデジタルシミュレーション法を確立し、またこれに基づいて汎用シミュレーションプログラムを開発した。ここでは、従来その解析、設計において、試作、実験などで行われていたシステムの動作、性能、素子責務の検討などをシミュレート実験で行うことができる。電気-機械エネルギー変換系のシミュレーションで特に問題となるのは、サイリスタ回路のスイッチ現象に伴うモード変化とエネルギー変換の非線形性を同時に取り扱わなければならないということで、従来の方法(例えば状態変数法)では、汎用性のあるシミュレーション法を開発することは困難であった。本研究では、タブロー法に基づく方法を電気-機械エネルギー変換系の解析に導入することにより、上記問題点を容易に解決することができ、非常に効率の良いプログラムを作成することができた。開発したプログラムを用いて種々のシステムに対し数値実験した結果、非常に汎用性があり効率の高いものであることが確認された。また本プログラムは入出力が容易で利用者に使い易い形となっている。

さて、タブロー法に基づくシミュレーション法においては、各計算ステップにおいて、すべてのシステムの変数を未知数とした線形代数行列方程式、すなわちタブロー方程式を解くことになる。その際、タブロー方程式のタブロー行列は非常にスパースなので、計算効率を高めるためのスパース処理法を開発することが重要となる。また電気-機械エネルギー変換系においては、そのエネルギー変換の非線形性のため、各計算ステップのタブロー行列が前のステップの解に依存するため、毎ステップごとにタブローを作りかえて解かなければならない。そのため、計算の高効率化手法を開発することが特に重要となる。そこで、第4章では第3章で論じたタブロー法によるシミュレーション法の実用性を高めるための種々の計算の高効率化手法を開発した。高効率化の方法としては次の2つの方法を提案した。すなわち、(1)電気-機械エネルギー変換系の潜伏性、すなわち機械系の現象の変化が電気系のそれに比べ非常に遅く、潜伏していることを利用して、変化の遅い機械系の計算をある一定期間省略することにより計算速度を高める方法、(2)電気-機械エネルギー変換系のタブローの特殊なブロック構造を利用してタブローを分割して計算し、計算効率を高める方法である。これらの方法を実際にプログラムに組み込み数値実験した結果、必要な精度を失うことなく計算効率を非常に高めることができることが確認された。

以上に述べたシミュレーション法を用いると、システムの任意に与えられた初期状態よりその過渡現象に沿って忠実にシミュレートすることができ、効率も良く実用的にも非常に有効な方法である。一方、定常状態を算出しようとする、過渡状態の長いシステムに対しては、定常状態になるまで何周期もシミュレーションしなければならず、計算時間が非常にかかり効率が悪い。特に電気-機械エネルギー変換系においては、機械系の過渡状態が電気系のそれに比べ非常に長く、一般にシミュレーション法で定常状態を求めるのは困難である。そこで、本論文の第5章および第6章では、サイリスタ回路およびそれを含む電気-機械エネルギー変換系の定常状態を高速に求める方法として、ニュートン法を用いた方法を提案し、また汎用定常解析プログラムを開発した。ここでは、問題を、定常解を与える初期値が満足する非線形方程式をニュートン法のアルゴリズムで解く問題として定式化した。ニュートン法を適用する際、問題となるのは、ヤコビ行列をいかに精度良く、かつ効率良く計算するかである。この問題に対し、まず第5章で静的なサイリスタ回路に対し、従来電子回路の感度解析に広く用いられているテレゲンの定理に基づく随伴回路を拡張して、サイリスタ回路に導入し、それを解析することによりヤコビ行列を計算する方法を提案し、その計算アルゴリズムを与えた。さらに第6章では、電気-機械エネルギー変換系に対しても、第2章で提案した回路グラフによるモデルを用いると、同様にテレゲンの定理に基づいて随伴系が構成でき、これを用いてヤコビ行列が計算できることを示し、その計算アルゴリズムを与えた。ここで提案した方法は、原理上、何ら近似を施すことなく厳密にヤコビ行列を求めることができ、また随伴回路あるいは随伴系はもとのシステムと同じ方法で解析できるので、第3章で論じたタブロー法によるシミュレーション法を用いて容易にプログラム化することができる。作成した汎用定常解算プログラムを、種々のシステムの定常解析に適用した結果、いずれも数ステップのニュートン法の補正で定常解を高速に求めることができ、非常に有効な方法であることが確認された。

第7章では、静的なサイリスタ回路を対象として、その定常状態に関して一般的に評価関数を設定し、これの回路内の一連のパラメータに対する感度の計算法を提案し、またこれをサイリスタ回路のパラメータ最適化問題に応用した。ここでは、パラメータ感度の計算法として、テレゲンの定理に基づく随伴回路を利用した方法について提案し、その計算アルゴリズムを与えた。ここで提案した方法の特徴は、サイリスタ回路の定常状態において設定された評価関数の回路内の一連のパラメータに関する感度が、もとのサイリスタ回路とその随伴回路のそれぞれの定常状態を求めるという操作で計算できるということである。したがって第5章で論じた汎用定常解算プログラムを用いて容易に効率の良いプログラムとして実現できる。さらに、この感度計算法を利用して、サイリスタ回路のパラメータ最適化プログラムを作成し、これをサイリスタ回路のパラメータ同定および波形ひずみ最小化問題に応用した。この結果より、提案した方法により評価関数のパラメータ感度を正しく、かつ効率良く計算することができ、さらに作成したパラメータ最適化プログラムは、これまでほとんど行われていなかったサイリスタ回路の最適設計、自動設計の1つの方法と成り得ることが確認された。

第8章は結論で、これまでほとんど困難とされていたサイリスタ回路およびそれを含む電気-機械エネルギー変換系のシミュレーション法、定常解算法、感度解析法に関して汎用性のある手法を確

立し、またそれに基づいて汎用プログラムパッケージを開発することができたこと、および今後に残された問題点を述べた。

## 論文審査の結果の要旨

近時パワーエレクトロニクスの急速な進展に伴い、それについての汎用性のある解析と設計法の確立が強く要望されている。本論文はそれに関連したものであって、デジタルシミュレーションによるサイリスタ回路を含む電気-機械エネルギー変換系の解析と設計について研究したものである。得られた主な成果を挙げると次のごとくである。

- (1) サイリスタ回路を含む電気-機械エネルギー変換系に対し、汎用性のあるデジタルシミュレーション法を確立し、またこれに基づいて汎用シミュレーションプログラムを開発した。この種のシステムの解析においては、サイリスタ回路の非線形スイッチ現象およびエネルギー変換機器の非線形特性を同時に考慮しなければならないため、従来の方法では汎用性のあるシミュレーション技法を確立することは困難であった。

本研究では、タブロー法に基づく方法を導入することにより、この問題を完全に解決し、非常に汎用性があり、かつ計算効率のすぐれたシミュレーションプログラムを開発することができた。

- (2) タブロー法に基づくシミュレーション法の実用性をさらに高めるためのシミュレーションの高効率化手法について考察し、高効率化の方法として二つの方法を提案した。すなわち(i)機械系の現象の変化が電気系のそれに比べ非常に遅いものであることを利用して、変化の遅い機械系の計算をある一定期間省略することにより計算速度を高める方法と、(ii)電気-機械エネルギー変換系のタブロー行列の特殊なブロック構造に着目し、分割タブローによるスパース処理によって、計算効率を高める方法である。これらの方法を実際にプログラムに組み込み数値実験した結果、必要な精度を失うことなく、非常に計算効率を高め得ることが確認された。

- (3) サイリスタ回路及びそれを含む電気-機械系の定常状態を高速に求める方法として、ニュートン法を用いた方法を提案し、またこれに基づいて汎用定常解析プログラムを開発した。ニュートン法のアルゴリズムを実行する際、問題となるのはヤコビ行列をいかに精度良く、かつ効率良く計算するかであるが、ここでは、電子回路の感度解析に広く用いられているテレゲンの定理に基づく随伴回路を利用した感度解析法をサイリスタ回路及び電気-機械系に拡張し、これに基づいてヤコビ行列を計算する方法を示した。これにより、非常に効率よく汎用性のある定常解析プログラムを開発することができた。

- (4) サイリスタ回路の定常状態におけるある評価関数の回路内のパラメータに対する感度を随伴回路を用いて計算する方法について考察し、その計算アルゴリズムを開発した。さらにこの感度計算法を利用して、サイリスタ回路のパラメータ最適化プログラムを作成し、サイリスタ回路のパラメータ同定及び波形ひずみ最小化問題に応用した。これより、ここで開発したパラメータ感度の計算法が、従来ほとんど行われていなかったサイリスタ回路の最適設計、自動設計の一つの方法と成り得

ることが確認された。

以上のように、本論文はサイリスタ回路を含む電気-機械エネルギー変換系について、その計算機援用解析と設計法を研究したものであり、汎用性のあるデジタルシミュレーション法について重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。

また、本研究は電気・電子工学、制御工学及びシステム工学の分野に関連する総合的研究であり、電力変換工学に寄与するところが大きい。よって、論文提出者 黒江康明は、学術博士の学位を得る資格があると認める。