

平成23年6月3日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560282

研究課題名（和文） 電力変換システムの高精度・高効率シミュレーション法の研究

研究課題名（英文） Study on Accurate and Efficient Simulation Methods of Power Conversion Systems

研究代表者

加藤 利次 (KATO TOSHIJI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：40148375

研究成果の概要（和文）：本研究は電力変換器すなわちパワーエレクトロニクス(PE)システムのシミュレーションを高精度・高効率に実施するための手法の開発を目的とした。そのため本研究はモデリング過程およびシミュレーション計算過程の2つにより構成され、両過程において高精度高効率な処理法を開発を行った。前者に関しては、周波数依存性のある素子を少数の集中定数素子で高精度・高効率にモデリングする低次元モデリング法を検討し、特に合成回路に負値の素子が発生しないような手法を開発した。さらにこの原理に基づいて作成したモデリングプログラムを用いることにより、測定周波数を考慮してPEシステムの簡潔なモデリングを行うことを可能とした。後者に関してはPEシステムのマルチレート性を有効に使うことで高効率にシミュレーション計算を行う回路分割法や周期定常解析法を開発を行ない、それらの並列処理化による高速化手法を開発した。最後にシミュレーション結果の実験システムによる検証を行ない、その妥当性を確認した。

研究成果の概要（英文）：This study developed accurate and efficient simulation methods of power conversion systems. It consists of two processes; one is the modeling process and the other is the simulation process. For the former, a reduced-order model synthesis method is developed and it extracts a lumped parameter equivalent circuit for a frequency-dependent complex component with a given degree of freedom. It has a special feature that it can synthesize the circuit only with the positive values of elements. It is validated experimentally by PE system modeling examples. For the latter, a circuit partitioning method and a steady-state periodic analysis method are developed and they can analyze a PE system accurately and efficiently. They can analyze the system faster by applying the proposed parallel algorithms. The simulated examples are validated experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：シミュレーション、マルチレートシステム、電力変換システム、包絡追跡法、
周期定常解析法、低次元モデル、誘導機の固定子巻線故障診断、並列処理

1. 研究開始当初の背景

パワーエレクトロニクス(PE)システムの設計・解析には、技術者の手計算のみによる限界にいたる場合が多々あり、従って必然的に回路シミュレータを活用せざるを得ないのが当時の現状であった。PEシステムのシミュレーション技術に関して国内においては、電気学会内の産業応用部門半導体電力変換技術委員会において「パワーエレクトロニクスシステムの系統的モデリングおよびシミュレーション技術協同研究委員会」(平成19年10月～21年9月)が設置されるにいたる5期の協同研究委員会において様々なPEシステムシミュレーション手法がすでに調査研究されてきていた。「パワーエレクトロニクスシステムにおけるモデリングとシミュレーション技術」、パワーエレクトロニクスシステムにおけるモデリングとシミュレーション技術協同研究委員会、電気学会技術報告参照)その委員会において、国内のみならず海外における例えば米国電気電子学会(IEEE)の Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)やパワーエレクトロニクス技術者会議(PESC)において、さらにはヨーロッパにおける EPE (European Conference on Power Electronics and Applications)で開発されつつある各種手法が調査検討されてきていた。そのためPEシステムのシミュレーションを高精度・高効率に実施する手法の開発は時宜を得ていた。

2. 研究の目的

本研究は電力変換器すなわちパワーエレクトロニクス(PE)システムのシミュレーションを高精度・高効率に実施するための手法の開発を目的とする。同システムのシミュレーションはモデリング過程およびシミュレーション計算過程の2つにより構成されるため、上記目的を達するためには両過程において高精度高効率な処理法が必要である。そのためには、まず前者に関しては周波数依存性のある素子を少ない個数の集中定数素子で高精度・高効率にモデリングする方法を開発する。後者に関してはPEシステムのマルチレート性を有効に使う高効率にシミュレーション計算を行う手法を開発する。それらを組み合わせて、例えば電力変換システムの電磁協調(EMC)解析等を高精度・高効率に

シミュレーションすることができる。

(1) 新しいモデリング手法の開発

PEシステムは小型・低騒音化を目指して高周波数でスイッチングされる傾向にある。そのため同システムを正確にシミュレーションしようとするときそれを構成する個々の素子が高周波までモデリングされなければならない。例えばコンバータのEMC解析を行うにはインダクタ、キャパシタ等の集中定数素子も周波数特性を持つ。そのためこれらをシミュレータに組み入れるためには周波数依存特性素子として処理する必要がある。しかしこれをそのまま処理すると数値処理過程において相乗計算となるため計算時間がかかり実用的でない欠点がある。そのためそれら素子を複数の集中定数素子の回路網で近似する方法が有用である。従来は単に最小自乗で等価回路モデルの素子パラメータが計算されていたが、素子パラメータが負値に計算される場合が多々あり、受動性が補償されない欠点があった。本研究ではモデル素子パラメータが正であることを保証する方法を開発する。さらにそれら素子の値は温度依存性があり、電力変換器が内部損失により温度が上昇すれば、当然素子値が変化する。従来はこの事実にもかかわらず、この温度依存性が考慮されていなかった。シミュレーションを高精度に行うためには素子の温度依存性による非線形な性質を組み入れる必要がある。本研究では最終的に周波数依存性と温度依存性を組み入れた高周波素子モデルを求めることを目的とした。

(2) 新しいシミュレーション計算手法の開発

PEシステムは、スイッチングによる変化(レート)の速い現象と、いわばそれを平均化したような変化の遅い現象を同時に伴うマルチレートシステムである。速い現象と遅い現象が異なる時間で現れるスティフ(硬い)システムの場合には可変の数値計算刻み幅で対応されてきて解決済みであるが、マルチレートシステムではそれらが同時に存在するため、スイッチングを無視してしまう平均化法が主力で、あまり研究がされていないのが現状である。本研究はマルチレートなPEシステムに対して、効率よく近似して高効率に回路シミュレーションする手法を開発するのが目的である。これに対して次の2

点の開発を行う。

まず、回路現象の変化の遅い変数を近似処理して回路方程式を簡略化するマルチレート過渡解析法が有効であり、この開発を行う。これには、スイッチング現象を間引きして近似的に考慮する包絡追跡法が有用である。この手法のアイデアはすでに開発されているが、その適用範囲は限られているため、その範囲を拡大する。

次に PE システムはスイッチングによる周期定常状態で解析される場合が多いため、マルチレート法による新しい周期定常解析法を開発する。そしてこれらがマルチレートな PE システムに対して高効率であるのかを実際に検証する。またその動作の検証には従来の手法との比較をはじめ、対象システムを実験的に検証することもあわせて行った。

3. 研究の方法

本研究は平成 20 年度より 3 年間にわたる計画により構成され、それらの過程は研究代表者を中心として、1 人の研究協力者（井上馨：同志社大学）と 12 人の研究協力者（藤原義大、久見木雄大、香川大輔、三宅裕希、奥田大介、江崎佐奈、古賀文瑛、東山弘治、寺西康弘：以上当時同志社大学工学研究科学生、山根雅史、向山直樹、吉田圭亮：同志社大学工学研究科学生）とにより遂行された。それらは以下の 3 つの開発・検証の過程にまとめられる。

(1) マルチレートシミュレーション法の開発

マルチレート法のうち回路分割法の原型（プロトタイプ）となるプログラムをすでに作成していたが、これを基にしてより一般的に適用できるプログラムの開発を行った。そのためにその原理をより広い視点よりとらえるため、シミュレーション手法に関連する書籍および論文の調査を行った。また包絡追跡法を周期定常解析法に組み合わせた高速な手法を開発し、その処理プログラムを作成した。最後に開発プログラムの並列化による更なる高速処理化を検討した。周期定常解析法では 16 台並列の PC クラスタを用いた。また回路分割法に関しては、クラスタ処理では困難であるためマルチコア CPU による処理を行った。

(2) 高精度・高効率な低次元モデリング法の開発

測定された回路システムや素子の周波数特性に基づく集中定数等価回路合成プログラムの開発を MATLAB にて行った。特に合成回路に負値の素子が発生しないような手法の開発を行なった。さらにそれら素子の値は温度依存性があり、電力変換器が内部損失により温度が上昇すれば、当然素子値が変化する。その

ため本研究では温度依存性を組み入れた高周波素子モデルも構成した。

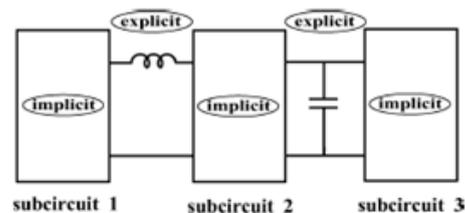
(3) 測定による PE システムのモデリングおよびシミュレーションの実験的検証

PE システムを各素子・構成要素のインピーダンスもしくはアドミタンスの周波数特性をインピーダンスアナライザにより測定して、その低次元化集中定数等価回路モデルの合成を行った。さらにそれらの等価回路を用いてシミュレーションをした結果とデジタル制御システムにより実験的検証を行った。

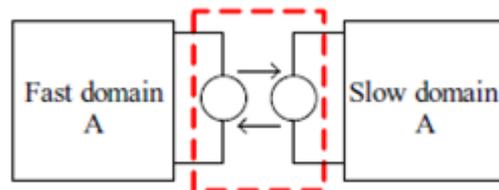
4. 研究成果

本研究は以上の方法により、電力変換器すなわち PE システムのシミュレーションを高精度・高効率に実施するためのシミュレーションおよびモデリング手法の開発および検証を行った。

(1) マルチレートシミュレーション法の開発

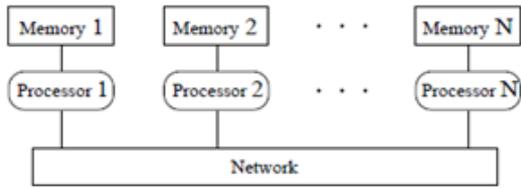


マルチレートな回路解析法に関して過渡解析および周期定常回路解析に関してそれぞれ新手法を開発することができた。まず過渡解析法としシステムを大きな直列のインダクタや並列のキャパシタで分割して部分回路ごとにマルチレートで解析する回路分割法（上図参照）が有用である。これに関して現有したプロトタイププログラムを基に発展させて、高速な手法を開発した。さらにこれにマルチコア CPU による並列処理化を行えばより高速化可能であることを確認した。特に速い変化の回路部分と遅い変化の回路部分が電気・機械等のドメイン毎に分離可能である場合にはそれらをドメイン毎に分割する方法が有用であることがわかり、ドメイン分割法を開発した。（下図参照）

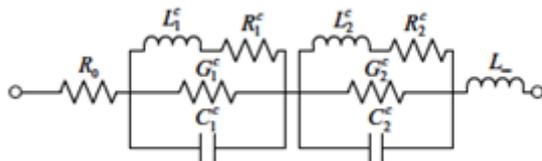
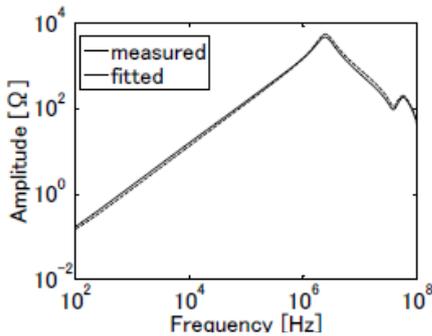


また周期定常回路解析に関して包絡追跡法とシューティング法を組み合わせることで精度を保ちつつ高効率な手法を開発した。これを 16

台並列のPCクラスタ(下図参照)を用いた並列処理化を行って、さらに高速化可能であることを確認することができた。



(2) 高精度・高効率な低次元モデリング法の開発

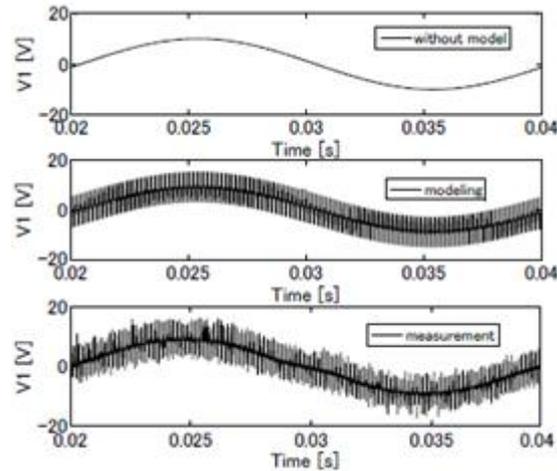


周波数依存性のある素子を少数の集中定数素子で高精度・高効率にモデリングする低次元モデリング法に関して、現有のものより発展させて、任意の指定次数に対して最適な等価回路を合成する手法を開発した。開発法は特に合成回路に負値の素子が発生しないような回路合成をおこなうことができることを特徴とし、数値計算的にはMATLABのLMIツールを用いて構成されている。これによれば、例えば上図上のインダクタのインピーダンス周波数特性より、上図下の等価回路を合成することができる。さらにこの開発手法は各温度毎の周波数特性を基に温度依存性を組み入れた高周波素子モデルも構成することができる。

(3) 作成モデルやシミュレーション手法の実験的検証

開発したマルチレート解析法の回路分割法、ドメイン分割法に関して実験的検証を行い、その結果の一致を確認している。また低次元モデリングプログラムを用いて、測定によるPEシステムのモデリングの実施、作成モデルによるシミュレーションと実験結果の比較を行ない、その妥当性を確認している。例えば単相フルブリッジインバータ回路を相補的にPWM制御して動作解析した例につ

いて下図に示す。これをフィルタや負荷を公称値のL, C, R素子で解析すると、出力の1端子電位は下図上段波形のようになり、高周波リップルは表現されない。しかし各素子を測定周波数特性を持つように開発モデリング法を用いて合成した回路モデルに置き換えて解析しなおすと下図(中段波形)のようになり、下図(下段波形)の実測結果と酷似した結果を得ることができている。



以上の成果により、本研究により開発した方法はPEシステムの性質をうまく利用して、近似できるところは近似し、必要なところは、スイッチングをも含めて考慮して高効率・高精度である点に特色がある。そのため、精度と速度との双方を考慮した実用的な計算法を開発することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① 加藤利次, 井上馨, 藤原義大: 「ドメイン分割連成方式によるパワーエレクトロニクスシステムのマルチレート解析法」, 電気学会論文誌D, 131巻, 1号, pp.110-117, 2011, 査読有
- ② Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Koji Higashiyama: “Energy-Based Digital Control of a Ripple Correction Circuit of an Unity-Power-Factor AC/DC Converter,” IEEE ECCE 2010, pp.2620-2625, 2010, 査読有
- ③ Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Yoshihiro Fujiwara: “Multirate Analysis Method for a Power Electronic System by Multi-Domain Partitioning,” the Twelfth IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, pp.1-8, 2010, 査読有
- ④ Kaoru Inoue, Yasuhiro Teranishi, Masatoshi Minamiyama, and Toshiji Kato: “Electric

- Energy Comparison of an Induction Motor Driven by Optimal Torques for Various Operation Time Periods,” the 2010 International Power Electronics Conference, pp.2477-2481, 2010, 査読有
- ⑤ Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Yudai Kumiki, Masashi Yamane: “Efficient Steady-State Computation of A Power Electronic Converter System by the Envelope Following Method,” the 2010 International Power Electronics Conference, pp.672-679, 2010, 査読有
- ⑥ Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Takayuki Fukutani, Yoshinori Kanda: “Multirate Analysis Method for a Power Electric System by Circuit Partitioning,” IEEE Trans. Power Electronics, Vol.24, No.12, pp.2791-2802, 2009, 査読有
- ⑦ Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Daisuke Kagawa: “Lumped Equivalent Circuit Model Synthesis for a Passive Element with Frequency-Dependent and/or Temperature-Dependent characteristics for EMC Simulation,” International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.150-156, 2009, 査読有
- ⑧ Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Daisuke Okuda: “Diagnosis of Multi-Phase Turn Faults of Induction Motor Stator Windings,” International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.144-149, 2009, 査読有
- ⑨ Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Daisuke Kagawa: “Lumped Equivalent Model Synthesis for a Passive Element with Frequency-Dependent and/or Temperature-Dependent characteristics for EMC Simulation,” International Power Electronics and Motion Control Conference, pp.963-969, 2009, 査読有
- ⑩ Toshiji Kato, Kaoru Inoue, Junichi Ogoshi, Yudai Kumiki: “Efficient Steady-State Simulation of a Power Electronic Circuit by Parallel Processing,” IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.2103-2108, 2008, 査読有

[学会発表] (計 2 3 件)

- ① 山根雅史, 加藤利次, 井上馨: 「パワーエレクトロニクスシステムの包絡追跡法による高効率な周期定常シミュレーション」, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-11-14, 2011年1月21日, 神戸ユニティー
- ② 古賀文瑛, 井上馨, 加藤利次: 「回路分割によるパワーエレクトロニクスシステムの並列回路シミュレーション」, 電気

- 学会半導体電力変換研究会, SPC-11-15, 2011年1月21日, 神戸ユニティー
- ③ 東山弘治, 加藤利次, 井上馨: 「高力率 AC/DCコンバータのリップル補償回路のエネルギーベースのデジタル制御法」, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-11-41, 2011年1月21日, 神戸ユニティー
- ④ 加藤利次: 「パワーエレクトロニクスシステムの系統的モデリングおよびシミュレーション技術:総論」, 平成21年電気学会産業応用部門全国大会, 2009年8月31日, 三重大学
(その他 学会発表 19件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 利次 (KATO TOSHIJI)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 40148375

(2) 研究分担者

井上 馨 (INOUE KAORU)
同志社大学・理工学部・准教授
研究者番号: 60343662

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

藤原 義大 (FUJIWARA YOSHIHIRO)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
久見木 雄大 (KUMIKI YUDAI)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
香川 大輔 (KAGAWA DAISUKE)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
三宅 裕希 (MIYAKE HIROKI)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
奥田 大介 (OKUDA DAISUKE)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
江崎 佐奈 (ESAKI SANA)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
古賀 文瑛 (KOGA FUMIAKI)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
東山 弘治 (HIGASHIYAMA KOJI)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
寺西 康弘 (TERANISHI YASUHIRO)
同志社大学工学研究科・学生(当時)
山根 雅史 (YAMANE MASASHI)
同志社大学工学研究科・学生
向山 直樹 (MUKAIYAMA NAOKI)
同志社大学工学研究科・学生
吉田 圭亮 (YOSHIDA KEISUKE)
同志社大学工学研究科・学生