

## 論文要旨

区分	甲	氏 名 城 所 仁
論文題名		
パワーエレクトロニクスを対象としたリアルタイム・シミュレータに関する研究		
論文の要旨		
<p>リアルタイム・シミュレータとは、フィードバック制御を行うコントローラを開発する場合に、実機での開発／検証が困難な場合において実機を代替する装置であり、制御対象を微分方程式による数学モデルで表し、古くはアナログ計算機、今日ではデジタル計算を用いてリアルタイムに、すなわち方程式の持つ時間軸と同一の物理的時間において方程式を計算する事で実現される。</p> <p>航空宇宙や自動車等の機械系の分野におけるコントローラの開発においては、リアルタイム・シミュレータは不可欠と言えるほどに活用されている。一方、パワーエレクトロニクスなど電気系の分野では、主な制御対象であるスイッチング回路の制御周期が機械系に比べ短い事により、オペアンプを用いたアナログ制御が主流で、ソフトウェアを用いたデジタル制御の登場はごく最近である事、リアルタイム性を要求されない回路解析に用いる回路計算手法の延長でリアルタイム・シミュレータの構築を行っているため十分な性能を得るには高価なハードウェアを必要とする事、などの理由により、現在ではスイッチング回路を代替する安価で使いやすいリアルタイム・シミュレータが提供されていない。このため、リアルタイム・シミュレータの普及が進んでおらず、これがパワーエレクトロニクス分野、特にデジタル制御されたスイッチング回路を利用したシステムの開発における大きな障害となっている。</p> <p>本論文では、この問題を解決するために、リアルタイム・シミュレータと回路解析用のソフトウェアとは目的を異とする存在であることに着目し、従回路解析用として研究されてきた様々な回路計算手法を、リアルタイム・シミュレータに応用する、との観点から再検討を加え、従来の手法では達成できなかった計算精度と計算速度を持つ計算手法を確立し、その手法に基づき、これまで非常に困難とされてきた実用性の高いリアルタイム・シミュレータを実現した。</p> <p>第1章は序論であり、リアルタイム・シミュレータの必要性、それが生み出された歴史的経緯、パワーエレクトロニクス分野での現状、そしてシミュレータの構成要素について述べた。</p> <p>第2章においては、シミュレーション技術の基礎である、常微分方程式の数値解法について、陽解法と陰解法の違いを明らかにし、各種計算手法について具体的な計算式と、計算が発散しない条件についての検討を詳細に行った。</p>		

第3章においては、節点解析法、修正節点解析法、スパースタブロー法、カットセット解析法という回路定式化手法を検討し、同一のサンプル回路がどのような方程式で表されるかを、それぞれの手法について示し、その得失を明らかにした。

第4章においては、スイッチング回路を対象としたリアルタイム・シミュレータに要求される特性について考察を行い、スイッチング動作における ON 時間と OFF 時間の比率、すなわち Duty 比の分解能が重要であり、高い Duty 比の分解能を得るためには、本論文で部分的可変ステップ法と名付けた計算アルゴリズムが、リアルタイム・シミュレータの従来例として報告の多い線形補間手法に対し優位である事を示した。さらに、部分的可変ステップ法を実現するためには、回路方程式としては第3章で検討したカットセット解析法で得られる連続系の状態方程式が最適であり、これを計算する常微分方程式の数値解法は第2章で検討した手法において、陽解法であり計算負荷が極めて低い1次ないし2次の Runge-Kutta 法が採用可能である事を示した。

従来、回路計算手法においては任意の回路を解析する事を目的としているため、いかなる回路方程式においても計算が発散しない台形積分などの陰解法を用いることが常識とされていたが、リアルタイム・シミュレータは制御ソフトウェアの開発を目的とするため、制御対象である特定の回路が計算できれば目的は達成されるという違いがある。デジタル制御が適用される、kW クラスの分野において主流である 20kHz のスイッチング周波数において、標準的な設計指針に基づく回路定数を持つ回路において、20kHz の制御周波数を持つコントローラに対応した計算ステップを用いた場合、計算効率の高い陽解法によって計算可能であることを、本論文では明らかにした。この事実はこれまで報告されておらず、これを見出したことは大きな発見である。

第5章においては、上記の 20kHz スwitching 周波数において、標準的な設計指針に基づく回路定数を持つハーフブリッジ型の DC/DC コンバータを対象に、これまで実現が非常に困難であった 1GHz のクロックで駆動される汎用のプロセッサにより構成されたリアルタイム・シミュレータを実現し、実回路との比較を行った。

さらに、汎用プロセッサより高速計算が可能な 100MHz で駆動される FPGA (Field Programmable Gate Array) によるリアルタイム・シミュレータも作成し、実回路との比較を行い、第4章において得た理論的結論を実験的に確認した。

第6章において、全体の総括として、上記の標準的な回路定数を持たない場合における効率的な計算手法について検討を行い、Semi-Implicit 手法が有望であることに言及し、今後の課題とした。

#### [作成要領]

1. 用紙は A 4 判上質紙を使用すること。
2. 文字の大きさは 10 ポイント程度とすること。
3. 要旨は、2,000 字程度にまとめること。
4. 本様式によりワープロ浄書すること。