

平成26年2月19日

崇城大学大学院

工学研究科委員会




研究科長 塩谷 捨明 殿

論文審査委員

主査 中原 正 俊



論文審査結果の報告（甲）

論文提出者	城所 仁 （1111D01）
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
審査委員	主査 教授 中原 正 俊  副査 教授 向井 栄 一  副査 教授 坂井 栄 治 

論文審査結果の要旨

近年の組み込み用マイクロプロセッサの進歩により、パワーエレクトロニクス分野においても、従来にないソフトウェアによる複雑で高度なデジタル制御が行われるようになってきている。一般に、このようなソフトウェアによる複雑な制御システムを開発する場合、リアルタイム・シミュレータを活用した開発法が用いられ、主に、自動車や航空機分野では大きな成果をあげている。しかし、パワーエレクトロニクス分野では、その主要回路であるスイッチング回路のリアルタイム・シミュレータの実現手法が確立しておらず、これが大きな問題となっている。

リアルタイム・シミュレータは、特性解析を目的とする通常の回路シミュレータとは異なり、主に、デジタル制御のコントローラ設計に用いられ、制御対象である実機のスイッチング回路に置換わって実時間で動作し、コントローラに必要な情報を出力するシミュレータである。したがって、リアルタイム・シミュレータは、通常の回路シミュレータに比べて非常に高速な計算が必要である。しかし、スイッチング回路は自動車などの機械系の動作よりも格段に高速で動作するため、そのリアルタイム・シミュレータの実現は極めて困難で、これまで実用的なリアルタイム・シミュレータは存在しなかった。

そこで、本論文では、パワーエレクトロニクスの主要回路であるスイッチング回路を対象にした実用的なリアルタイム・シミュレータを実現する計算手法を確立することを目的としている。

最初に、スイッチング回路のリアルタイム・シミュレータを実現するための計算手法を、微分方程式の数値解法、回路方程式の構築手法、スイッチング回路特有の課題を解決する手法の三段階に分けて、様々な計算手法に対して詳細に理論的な吟味を行った。

まず、微分方程式の数値解法においては、計算手法は多数存在し、陽解法と陰解法に大別される。陽解法では数値計算の安定性は条件付で保証されるが計算速度は速く、一方、陰解法は、数値計算の安定性は無条件で保証されるが計算速度は遅い。公表されている汎用の回路シミュレータでは、数値計算の安定性が最重要条件であるため、ほとんどの場合陰解法を用いている。一方、リアルタイム・シミュレータでも、従来の研究報告では、計算手法の詳細な吟味はほとんど行われることなく、汎用回路シミュレータに従って陰解法を用いている場合がほとんどである。しかし、本論文では、リアルタイム・シミュレータにおいては、制御ソフトウェア開発が目的であるため制御対象となる回路が安定に数値計算できればよいこと、計算手法の高速性が重要条件となることを考慮し、従来の研究では採用されなかった陽解法を採用した。陽解法で問題となる数値計算の安定性については、通常のスイッチング回路の妥当性のある回路定数を用いる場合、陽解法の安定条件が満足されることを、本論文で初めて数値的に明らかにした。

次に、回路方程式の構築手法においては、節点解析法、タブロー法などの方法が考案されている。その中で、最も主流なのが節点解析法で、リアルタイム・シミュレータも含め大半の回路シミュレータがこれを採用している。しかし、この方法には、スイッチング回路に対しては大きな欠点が存在する。スイッチング回路のオンオフの切り替わり時刻を正確に検知して計算するには、計算のステップ時間を変化させる必要がある。このとき、節点解析法では、回路方程式を構成する行列を再構築する必要があり、これが大きな計算負荷となる。そこで、本論文では、節点解析法ではなく、ステップ時間を変更しても行列の再構築が不要である状態方程式を採用した。

次に、スイッチング回路特有の課題であるスイッチのオンオフ切り替わり時刻の検知に関する計算手法について検討した。本論文では、スイッチング回路を精度よく計算するために、スイッチのオンオフ時刻を厳密に検知し、それに基づいて計算のステップ時間を変更する独自の部分的可変ステップ法を提案した。従来の方法では、計算時間を短縮するために、固定ステップ法で計算を行っており、十分な計算精度が得られなかったが、この部分的可変ステップ法により十分な計算精度で計算が可能になった。

以上、スイッチング回路のリアルタイム・シミュレータを実現する手法として、陽解法による微分方程式の数値計算、状態方程式による回路方程式の構築、部分的可変ステップ法の採用が最適であると結論づけた。

最後に、これまでの理論的議論に基づいて、例としてハーフブリッジ型昇圧スイッチングコンバータを対象に、実際のリアルタイム・シミュレータを二つの場合に対して実現した。第一の場合は、汎用のプロセッサを用いたスイッチング周波数20kHzのリアルタイム・シミュレータの実現である。20kHzのリアルタイム・シミュレータを実現する場合、従来では汎用プロセッサではなくより高速なFPGAを用いて実現するのが常識であったが、本研究により初めて、FPGAより各段に安価で使いやすい汎用プロセッサでの実現が可能になった。第二の場合は、FPGAを用いたスイッチング周波数100kHzで動作する高速リアルタイム・シミュレータの実現である。これまで、100kHzで動作するリアルタイム・シミュレータは実現されておらず、本研究により初めて実現された。

以上、本論文は、パワーエレクトロニクスの主要回路であるスイッチング回路を対象にした実用的なリアルタイム・シミュレータを実現する手法を確立した。

最終試験結果の要旨

本論文の成果により、リアルタイム・シミュレータを活用した最新の開発法を複雑化するパワーエレクトロニクスシステムにも応用することが可能になり、その設計開発が大幅に効率化されることが期待できる。したがって、申請者は博士（工学）の学位に値するものと認めた。

提出論文について、審査委員より、リアルタイム・シミュレータの意義、提案手法の汎用性、本研究で実現できた内容の新規性、今後の課題などに関して質問がなされたが、いずれも申請者より適切な回答が得られた。

また、公聴会においては、出席者より活発な質疑が行われ、様々な質問がなされたが、いずれも申請者の説明より質問者の理解が得られた。

以上の結果より、申請者は最終試験に合格したものと認めた。