

昇圧型 DC-DC コンバータを高速にシミュレーションする手法およびアルゴリズムに関する研究

A study of the method and its algorithm to simulate a boosting DC-DC converter in high speed

杉本 尚子^{*1} 鈴木 優宏^{*2} 杉本 泰博^{*2}
 Shoko Sugimoto Masahiro Suzuki Yasuhiro Sugimoto

^{*1} 株式会社アドイン研究所 ^{*2} 中央大学大学院理工学研究科

^{*1}Advanced Intelligence Reserch Inc., ^{*2}Graduate School of EECE, Chuo University

1. はじめに

DC-DC コンバータ設計には SPICE 等のシミュレータを用いる。しかし、「過渡解析に時間がかかる」、「周波数特性が得られない」と言う問題がある。我々はこれらの問題点を解決する手法として以前に、MATLAB/Simulink の機能シミュレータを用い高速でシミュレーションする手法を開発し、降圧型 DC-DC コンバータに適用して良好な結果を得た[1], [2]。これを基に今回、昇圧型 DC-DC コンバータについて高速シミュレーションが実現できるか検討したので、ここに報告する。

2. 出力部のモデル化手法

検討を行った昇圧型 DC-DC コンバータの出力部の構成を図 1 に示す。昇圧型の出力部は LC フィルタだけではなく、MOS トランジスタを用いたスイッチやダイオードなどが含まれる非線形な回路である。スイッチの状態により、節点が短絡するかどうか、電流が流れるかどうかが決まる。また機能シミュレータにはダイオードの特性の様な一方向性を表すような表現は無く、これらの機能をいかに実現するかが鍵となる。

なお降圧型 DC-DC コンバータでは出力部を状態変数表現によりモデル化した。ただし降圧型では L や C などの線形回路の中に非線形回路であるスイッチは含まれなかった。しかし昇圧型では線形回路と非線形回路が同居する形となる。そこでまず第 1 の非線形素子であるスイッチのオン、オフを表すために制御信号により制御される u_2 (オンで 0, オフで 1) という第 1 のパラメータを定義した。次に第 2 の非線形素子であるダイオードの一方向性を u_3 (コイル電流の方向が正常であれば 1, 逆方向であれば 0) という第 2 のパラメータを導入して表わす事にした。この結果の状態方程式および出力方程式を式(1)に示す。式(1)にはインダクタの直列抵抗 R_L 、コンデンサの直列抵抗 R_c (ESR)も含まれる。ただしスイッチのオン抵抗による電圧誤差を今回は含んでいない。

式(1)を機能シミュレータ上にモデル化したのが図2である。図中少量の遅延(Transport Delay)を与えたのは、機能シミュレータ内での計算がループに入り込まないようにしたためである。これは $i_L(t)$ を帰還することでループが出来あがるからである。

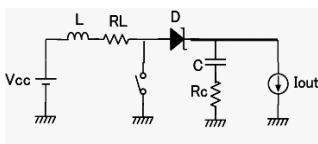


図1. 出力フィルタの構成図

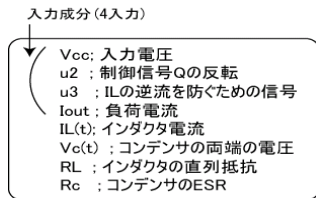
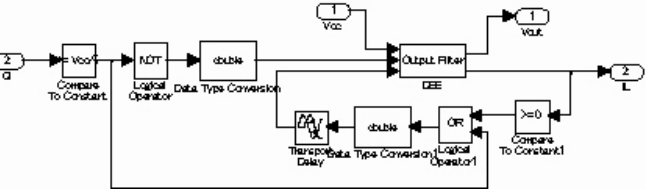


図2. 昇圧型 DC-DC コンバータの構成図



3. シミュレーション結果

実際に設計された昇圧型 DC-DC コンバータ IC の回路の特性を SPICE でシミュレーションした結果と、図 2 を MATLAB/Simulink 上に組み込んで実際に設計された IC を機能ブロック化して表したものの特性をシミュレーションした結果を比較した。図 3 にループ全体の利得と位相の周波数特性を表す。DC-DC コンバータはアナログ回路とデジタル回路が混在するシステムであるため SPICE で周波数特性をシミュレーションするには長時間が必要である。図中 SPICE の結果は×印で示した 5 点のみだが、この 5 点で CPU タイムで 62 時間を要した。これに対し MATLAB/Simulink を用いると濃い実線で表す 25 点をプロットして 7 分で済む。シミュレーション時間は、約 1/40 になった。しかも両者の特性は完全に一致した。これは SPICE でのシミュレーションが不要であることを意味する。

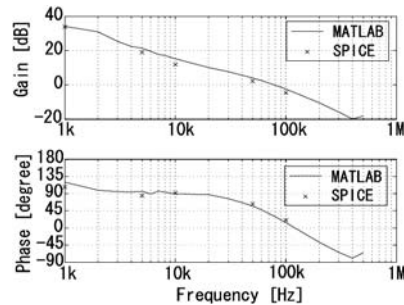


図3. 昇圧型DC-DCコンバータの周波数特性

表1. シミュレーション時間の比較

	シミュレーション時間(分)
SPICE	62
MATLAB	7

プロット数
 SPICE:5点
 MATLAB:25点

4. まとめ

昇圧型 DC-DC コンバータにおいても、MATLAB/Simulink を用いる機能シミュレーション手法が有効であることを確認した。シミュレーションの結果は SPICE と MATLAB で良く一致し、シミュレーション時間も大幅に削減された。

参考文献

- [1] 川端千尋, 杉本泰博; MATLAB/Simulink を用いた DC-DC コンバータのシミュレーション手法に関する検討; 電子情報通信学会技術研究報告, [集積回路], ICD-2008-66, Vol.108, No.253, pp.43-48, 2008 年 10 月.
- [2] 鈴木優宏, 川端千尋, 杉本泰博; DC-DC コンバータの高速かつ高精度なシミュレーションを実現する手法に関する検討; 電子情報通信学会 2009 年総合大会, エレクトロニクス講演論文集 2, C-12-23, p.111, 2009 年 3 月.

$$\begin{aligned}
 \frac{dv_c(t)}{dt} &= \frac{1}{C} \left\{ u_2 i_L(t) - \frac{v_c(t) + u_2 i_L(t) R_c}{R_{out} + R_c} \right\} \\
 \frac{di_L(t)}{dt} &= \frac{1}{L} \left\{ V_{cc}(t) - R_L i_L(t) - u_2 \frac{v_c(t) + u_2 i_L(t) R_c}{R_{out} + R_c} - u_2 V_f \right\} u_3 \\
 v_{out}(t) &= \frac{v_c(t) + u_2 i_L(t) R_c}{R_{out} + R_c} \\
 i_L(t) &= i_L(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$