

## スイッチング電源のためのシミュレータの開発

内田 真十郎\* · 石塚 洋一\*\*  
黒川 不二雄\*\* · 松尾 博文\*

## Development of a Simulator for Switching Power Supplies

by

Shinjuro UCHIDA\*, Yoichi ISHIZUKA\*\*  
Fujio KUROKAWA\*\* and Hirofumi MATSUO\*

The switching power supply is composed of not only the power source and linear elements such as the inductor, capacitor and resistor but also the nonlinear ones such as the MOSFET and diode. Therefore, its circuit behavior is complicated and there coexist multiple circuit operations that have largely different time scales. For this reason, it is often observed that the calculation time to analyze the switching power supply is very long and that the analysis cannot be performed in the worst case. This paper presents a new simulator to analyze switching power supplies. After reviewing the problem of the conventional simulators such as PSpice and PSIM, we proceed to propose and evaluate a new simulator as to calculation time and precision. As a result, it is revealed that the proposed simulator has superior performance.

## 1. まえがき

近年、電子計算機はハード面での性能の向上と OS を含めたソフト面での利便性により世間一般に広く浸透した。この様な状況に伴い、電気・電子回路の特性を手間の要する実験ではなく電子計算機上で把握できるシミュレータの研究、開発が盛んに行われる様になった<sup>(1)~(3)</sup>。スイッチング電源においてもシミュレーション技術は効果的に利用されているが、低周波で動作する部分と高周波で動作する部分が混在するステイフな系であることや、スイッチ素子の非線形な特性等のために従来のシミュレータを用いて解析を行うと効率が悪い場合がある。例えば、電気・電子回路用のシミュレータの中でも、PSpice<sup>(4)</sup> は世界で広く用いられているが、これをスイッチング電源に適用すると収束計算、掃き出す膨大なデータ量、過剰な機能等のため非常に多くの解析時間を必要とし、又、最悪の場合には解析が途中で終了してしまう事もある。このよう

な問題を解決するため、短時間で回路動作を確認する事ができるシミュレータが開発され実用化されている。しかし、これらの回路動作の確認を行う事ができるシミュレータを用いても、計算精度、計算速度の点で問題が生じる<sup>(5)</sup>。

本論文では、まず昇降圧形 DC-DC コンバータ回路について実際の回路動作に近い解析ができる PSpice と回路動作を確認できるシミュレータとして有効である PSIM<sup>(3)</sup> を行いてシミュレーションを行い、これら従来のシミュレータを用いてシミュレーションを行う際の問題点を指摘する。次に、スイッチング電源の特徴を捉え、これに適したシミュレータを提案、試作し、昇降圧形回路に対してシミュレーションを行い提案方式の評価を行う。又、対象とする回路を、動作が複雑で規模も少し大きくなる昇降圧電圧半波共振方式 DC-DC コンバータ回路についても同様に従来のシミュレータと提案方式によりシミュレーションを行い、

平成13年11月12日受理

\*生産科学研究科 (Production Science and Engineering)

\*\*電気電子工学科 (Department of Electrical and Electronics Engineering)

比較, 検討する。

2. 昇降圧形 DC-DC コンバータのシミュレーション

図1に昇降圧形 DC-DC コンバータの回路図を示す。回路パラメータとして, 入力電圧  $E_i=20V$ , リアクトル  $L=0.5mH$ , キャパシタ  $C=470\mu F$ , スイッチング周波数  $f_s=20kHz$  としデューティ比は0.5である。又, 最初にこのコンバータをリアクトル電流不連続モードで動作させるため, 負荷抵抗  $R$  を  $300\Omega$  に設定する。この回路について PSpice と PSIM を用いてシミュレーションを行う。

シミュレーションを行うにあたり, PSpice と PSIM について簡単に説明する。まず, PSpice では図2に示すような MOSFET, ダイオードの特性を図3に示す様な実際の素子の特性に合わせたモデリングが成されている。今回, MOSFET は図3(a)に示すような特性の IRF150 のモデル, ダイオードは図(b)に示すような特性の Dbreak という PSpice に標準のモデル<sup>(4)</sup>を使用した。これに対して PSIM では, 図4の

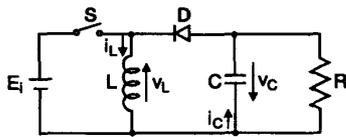


図1 昇降圧形 DC-DC コンバータ

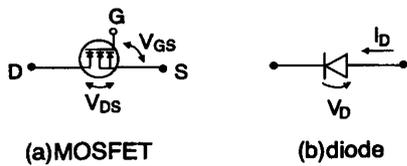


図2 スイッチ素子

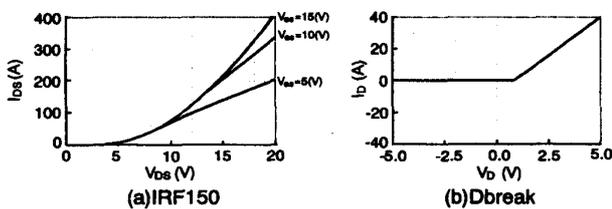


図3 PSpice におけるスイッチ素子の特性

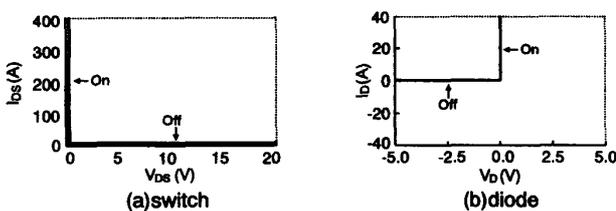


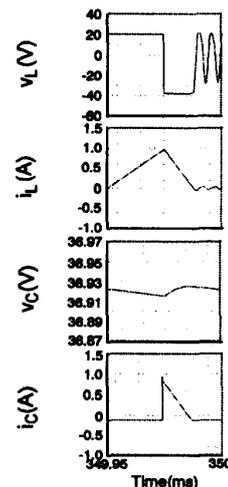
図4 PSIM におけるスイッチ素子の特性

様にスイッチ素子の特性をオン, オフの状態に分け, オン時に微小抵抗, オフ時に高抵抗を挿入する事で解析を行っている。

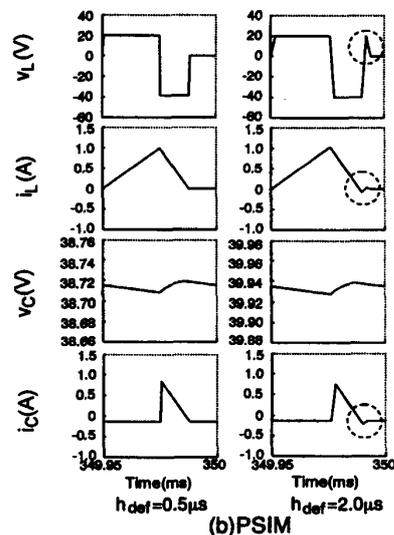
計算ステップ幅は PSpice では詳細に解析を行うため変動の大きいパラメータに合わせてステップ幅を細かくし, 又収束計算を行うため可変である。これに対して, PSIM では精度をある程度犠牲にして計算速度に重点を絞っているため固定ステップ幅を使用している。

シミュレーションを行う条件として, CPU が Pentium II, 450MHz で内部メモリが 256MB のパーソナルコンピュータを用い, シミュレーションの最終時間は状態が十分定常に落ち着くのを考慮に入れた 350ms である。

図5にこの2つのシミュレータを用いてシミュレーションを行った時のリアクトル  $L$  を流れる電流  $i_L$  と電圧  $v_L$ , キャパシタ  $C$  を流れる電流  $i_C$  と電圧  $v_C$  の波形を示す。但し, PSpice では計算ステップ幅は自



(a) PSpice (ステップ上限 0.5 $\mu$ s)



(b) PSIM

図5 各シミュレータによる波形

動的に変わるがステップ上限を $0.5 \mu\text{s}$ とし、PSIMでは固定ステップ幅 $h_{\text{def}}$ を $0.5 \mu\text{s}$ と $2.0 \mu\text{s}$ に設定した。図5(a)及び(b)のシミュレーション結果から両シミュレータとも、おおよそ同程度の結果を得ていることが分かる。この時、解析時間はP Spiceで9分19秒、PSIMでは $h_{\text{def}}$ が $0.5 \mu\text{s}$ の時に1分46秒であり、PSIMの解析の高速性が分かる。

しかし、実際の回路で生じるダイオードオフ時の $v_L$ の振動が、図5(a)に示すようにP Spiceではモデル内の寄生容量分の効果によりシミュレーション結果に現れるが、PSIMでは、スイッチがオフ時には高抵抗で表せるため、図6(d)に示す様にLの片方の端子が開放に近い状態で計算されるため図5(b)に示すように一定値になっている。

また、PSIMではステップ幅を任意に決定することが出来るため、ステップ幅を大きくする事で解析時間をさらに高速化可能である。しかし、図5に示す様に $h_{\text{def}}$ を $2.0 \mu\text{s}$ にすると、解析時間は $0.5 \mu\text{s}$ の時に比べて28秒と高速になるが、 $v_L$ や $i_L$ 、 $i_C$ の点線で囲んだ部分に誤差が生じ、キャパシタ電圧 $v_C$ も大きく変動してしまい、解析精度が低下してしまう。

ここまですべてをまとめると、

- 1) P Spiceは実際の回路動作に近い解析を行うことができるが解析時間が長くなる
- 2) PSIMは回路動作を確認することができ、解析時間も短い計算ステップの取り方により精度が著しく低下する

ということが言える。そこで、回路動作を短時間で精度良く確認できるシミュレータを以下に提案する。

### 3. スwitching電源の解析に適したシミュレータの提案

スイッチング電源は一般的にスイッチ、ダイオードのオン、オフの状態により生じる線形な等価回路を時間に応じて組み合わせることにより解析可能である。そこで、提案手法においてはこれを利用する。まず、スイッチ、ダイオードのオン、オフの状態により生じる線形な各等価回路について解析を行うためスイッチ素子をオン時に微小抵抗、オフ時に開放として取扱う。但し、場合によりオフ時には高抵抗を挿入する。スイッチとダイオードの状態の判断は表1に示すように、まずスイッチについてはゲート信号のオン、オフによりその状態を決定し、ダイオードについてはその両端の電圧 $V_D$ の正負で決定する。この様にスイッチ素子を取扱うと図1に示した昇降圧形DC-DCコンバータ回路は図6に示す4つの線形な等価回路に分ける事が

できる。この等価回路を時間に応じて組み合わせる事により解析を行うが、この等価回路は図6(c), (d)の様に計算対象から外しても解析上差し支えない場合が多い。そこで、この部分を除いた点線で囲んだ部分のみ定式化を行う事で行列式を縮小し、解析時間の短縮化を図る。

図7に提案するシミュレータのフローチャートを示

表1 スwitchとダイオードの状態判断

素子 \ 状態	ON	OFF
スイッチ	G:ON	G:OFF
ダイオード	$V_D > 0$	$V_D \leq 0$

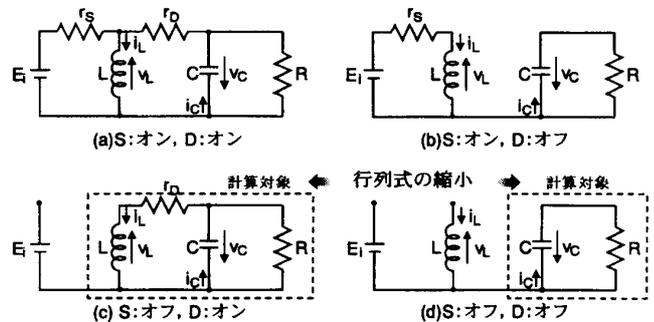


図6 図1の等価回路

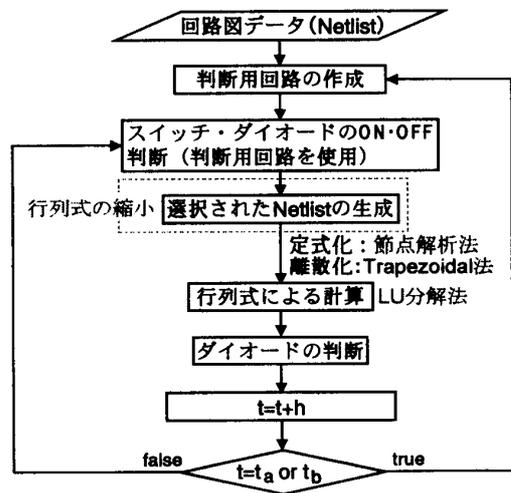


図7 提案するシミュレータのフローチャート

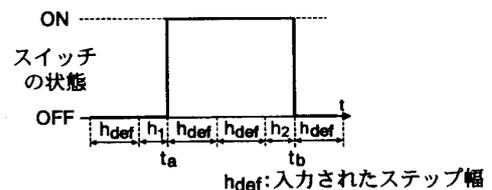


図8 スwitchのON・OFFのタイミングに合わせたステップ変化

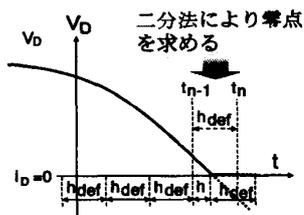


図9 ダイオードの状態遷移に伴うステップ変化

す。まず、入力された Netlist と呼ばれる回路図データを基に全てのダイオードの状態をオンと仮定した判断用回路を作成し、その時点でのスイッチ・ダイオードのオン、オフの判断を行う。次に、そこで得られた線形な等価回路に対して行列式を用いて解析を行う。この場合、図 6(c), (d)で示した計算対象から外しても解析上影響が無い素子についてはこれを定式化しないことにより、行列式を縮小する。なお、定式化には節点解析法、離散化にはデフォルトで Trapezoidal 法、行列式の求解法には LU 分解法を用いる。スイッチがターンオン、ターンオフのタイミングで無ければダイオードの判断のみを行い行列計算を継続する。又、スイッチがこのタイミングであれば再び判断用回路を作成し、同様にして解析を行っていく。

計算ステップ幅は、通常は入力された基本ステップ幅  $h_{def}$  を用いるが、状態遷移のタイミングに合わせて変化させる。例えば、スイッチがターンオン、ターンオフする場合には図 8 に示している様にスイッチがターンオンする前の  $h_1$  とターンオフする前の  $h_2$  の様にステップ幅を変化させる。一方、ダイオードの状態が変わる場合には、スイッチの様に前もって状態が遷移するタイミングが分からない。このため、計算を行う度に両端の電圧を監視しておき、ある時刻  $t_n$  と一つ前の時刻  $t_{n-1}$  でのダイオードの電圧  $V_D$  の積をとり、これ

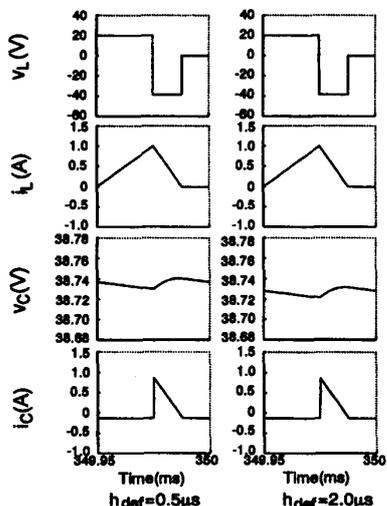
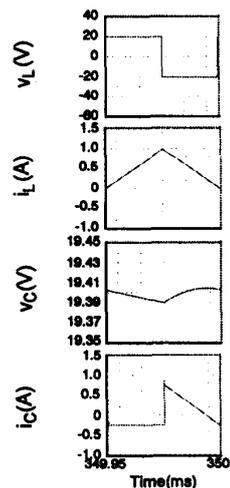


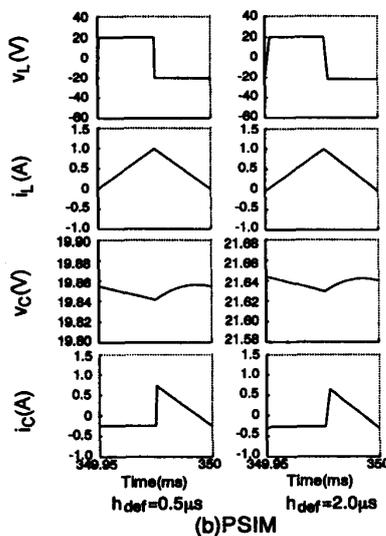
図10 提案手法によるシミュレーション波形

が負である場合には 2 分法により  $V_D$  が零になる点を精度良く求める。この様に、状況に応じて計算ステップ幅を変化させる事により、提案するシミュレータでは計算精度の向上を図っている。

以上の手順により、図 1 の昇降圧形 DC-DC コンバータ回路に対してシミュレーションを行う。シミュレーション波形を図10に示す。この図より、図 5(c)の PSIM と同様に解析を行う事が出来ていることが分かる。又、PSIM では計算ステップ幅を  $2.0 \mu s$  とすると解析精度が低下し、キャパシタの電圧  $v_C$  も大きく変動したのに対して、提案手法では基本ステップ幅を  $2.0 \mu s$  としても、状態遷移のタイミングに応じて計算ステップ幅を変化させているため  $0.5 \mu s$  の時の波形とほとんど変化が無い事が分かる。解析時間は  $h_{def} = 0.5 \mu s$  の場合に 1 分 20 秒、 $h_{def} = 2.0 \mu s$  の場合で 28 秒となり、PSIM と比較して約 26% の解析時間で同程度の結果を得ることが確認された。



(a)PSpice(ステップ上限0.5μs)



(b)PSIM

図11 リアクトル電流連続モードにおける各シミュレータによる波形

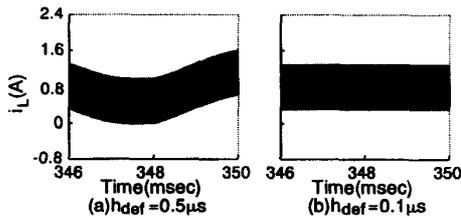


図12 PSIMによる  $t=346\sim 350\text{ms}$  のリアクトル電流の波形

次に、負荷抵抗を  $80\ \Omega$  とし、リアクトル電流連続モードにおける検討を行う。図11に、PSpiceとPSIMを用いてシミュレーションを行った時の回路各部の波形を示す。但し、リアクトル電流不連続モードの場合と同様に、PSpiceではステップ上限を  $0.5\ \mu\text{s}$ 、PSIMでは基本ステップ幅  $h_{\text{def}}$  を  $0.5\ \mu\text{s}$ 、 $2.0\ \mu\text{s}$  に設定した。シミュレーション結果として、PSpiceでは解析時間がリアクトル電流不連続モードの場合に比べて7分58秒と短くなった。PSpiceでは、計算ステップ幅が変動の大きいパラメータに合わせて自動的に可変となるため解析精度の良い結果が得られている。PSIMでは、 $h_{\text{def}}$  が  $0.5\ \mu\text{s}$  の時と  $2.0\ \mu\text{s}$  の時で  $v_C$  が大きく異なっている事が分かる。又、 $0.5\ \mu\text{s}$  の場合でもリアクトル電流が図12(a)のように振動している。この振動は、

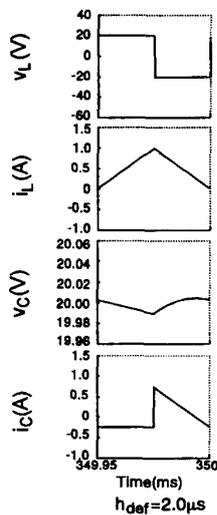


図13 提案手法によるリアクトル電流連続モードのシミュレーション波形

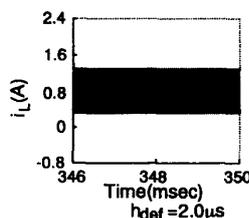


図14 提案手法による  $t=346\sim 350\text{ms}$  のリアクトル電流の波形

$h_{\text{def}}$  が大きいと計算誤差が生じ、これが蓄積されて生じるものと思われる。そこで計算ステップを更に細かい  $0.1\ \mu\text{s}$  とするとこの振動は観測されなくなった。解析時間は  $h_{\text{def}}$  が  $0.5\ \mu\text{s}$  の時に1分46秒、 $2.0\ \mu\text{s}$  の時に26秒とリアクトル電流不連続モードの場合とほとんど変わらなかった。尚、正確にシミュレーションを行う事ができる計算ステップ幅  $0.1\ \mu\text{s}$  では解析時間は8分59秒と非常に長くなる。

図13に、提案手法により、このリアクトル電流連続モードにおけるシミュレーション波形を示す。この図から、リアクトル電流不連続モードの場合と同様に基本ステップ幅を  $2.0\ \mu\text{s}$  と比較的大きく設定しても精度の高い結果が得られたことが分かる。解析時間も25秒とPSIMに対して約5%と非常に高速であった。なお、図14に示す様に提案手法では  $2.0\ \mu\text{s}$  でシミュレーションを行ってもリアクトル電流に振動は観測されない。

#### 4. 昇降圧電圧半波共振形 DC-DC コンバータのシミュレーション

図15に昇降圧電圧半波共振方式 DC-DC コンバータの回路図を示す。この回路は図1の昇降圧形 DC-DC コンバータのスイッチ  $S$  に対して並列に共振用キャパシタ  $C_S$  が直列に共振用リアクトル  $L_S$  が接続されている。スイッチ  $S$  がターンオフすると  $L_S$  と  $C_S$  により共振スイッチがターンオンする。この回路の回路パラメータは、入力電圧  $E_i=10\text{V}$ 、リアクトルのインダクタンス  $L=0.5\text{mH}$ 、キャパシタのキャパシタンス  $C=470\ \mu\text{F}$ 、負荷抵抗  $R=10\ \Omega$ 、共振用リアクトルのインダクタンス  $L_S=34\ \mu\text{H}$ 、共振用キャパシタのキャパシタンス  $C_S=0.1\ \mu\text{F}$ 、スイッチング周波数  $f_S=50\text{kHz}$  とし、デューティ比は0.5である。

図16に PSpice と PSIM を用いてシミュレーションを行った時の共振用キャパシタ  $C_S$  の電圧  $v_{C_S}$  と電流  $i_{C_S}$ 、リアクトル  $L$  を流れる電流  $i_L$ 、キャパシタの電圧  $v_C$  の波形を示す。但し、十分な解析精度が得られると考えられるステップ幅として PSpice ではステップ上限を  $0.1\ \mu\text{s}$ 、PSIM では固定ステップ幅  $h_{\text{def}}$  を  $0.1\ \mu\text{s}$ 、 $0.3\ \mu\text{s}$  に設定する。図16(a),(b)のシミュレーション

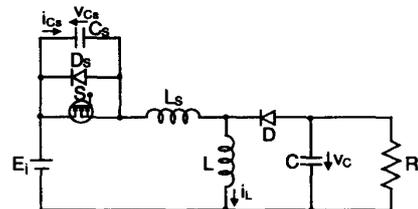


図15 昇降圧形電圧半波共振形 DC-DC コンバータ

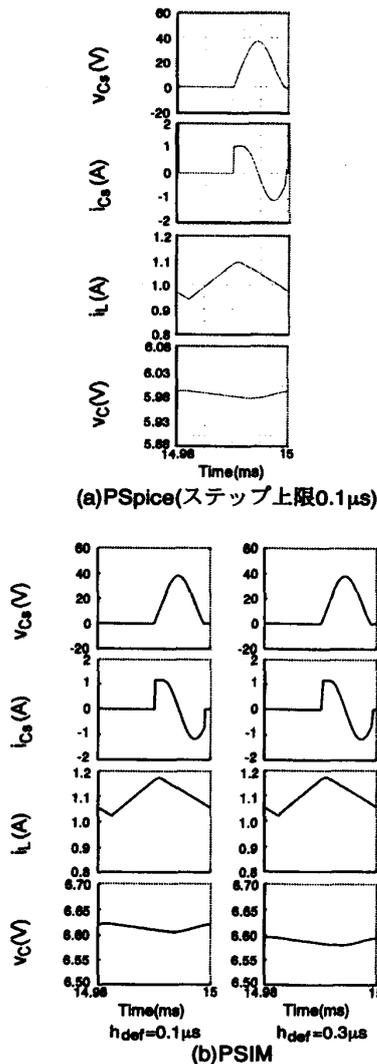


図16 図15の共振形回路における各シミュレータによる波形

オン波形より PSpice と  $h_{def}$  が  $0.1 \mu s$  と設定した時の PSIM の結果において精度の高い結果が得られたことが分かる。PSIM では  $h_{def}$  を  $0.1 \mu s$  から  $0.3 \mu s$  とするとキャパシタ電圧  $v_C$  が大きく変動している事が分る。

解析時間は PSpice で 1 分 22 秒, PSIM では  $h_{def}$  が  $0.1 \mu s$  の時に 36 秒,  $0.3 \mu s$  の時に 12 秒であった。

次に, 提案手法により図15の共振方式の回路についてシミュレーションを行う。図15の回路はスイッチ S, ダイオード D, スイッチと並列に接続されたダイオード  $D_S$  のオン, オフにより図17に示す 6 つの線形な等価回路に分ける事ができる。提案手法では, この共振方式の回路の場合もこれらの線形な等価回路を時間に応じて組み合わせる事で解析を行う。ここで, 図17(a), (b)の回路において点線で示した素子はスイッチのオン抵抗  $r_s$  と並列に接続されているため計算対象から外す。

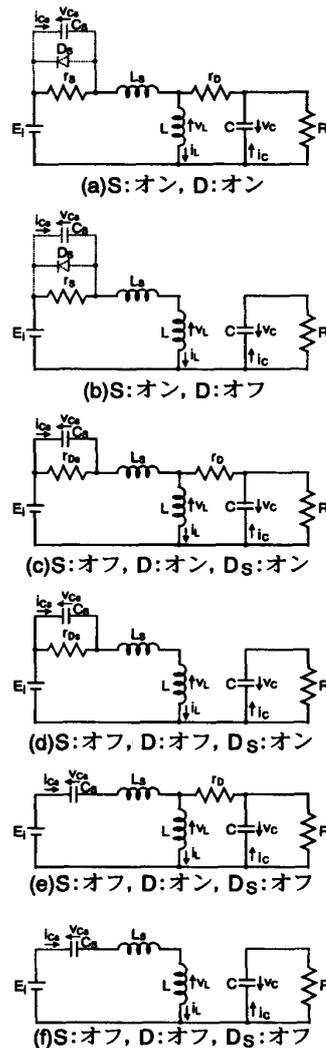


図17 図15の共振形回路の等価回路

図18に提案手法によるシミュレーション波形を示す。基本ステップ幅が  $0.1 \mu s$  では, 解析時間が 33 秒であり, PSIM の 36 秒に比べて僅かであるが短時間で図18に示す様に同等の解析結果を得ることができた。さらに基本ステップ幅を  $0.3 \mu s$  とした場合も PSIM と異なり  $h_{def}$  を  $0.1 \mu s$  と設定した時と同程度の結果を解析時間 14 秒で得ることが可能であることが確認された。従って提案方式は  $h_{def}$  を  $0.3 \mu s$  と荒くしても解析可能であり, 結果として PSIM の解析時間の約 40% で済む。

よって提案手法は, 基本ステップ幅を大きく設定しても詳細な解析を必要とする区間のみは, ステップ幅が適度な大きさに自動的に変化するため, 解析の高速化と高精度の解析を両立可能であることが分かる。

5. むすび

以上, 従来の PSpice, PSIM といった 2 つのシミュレータを用いてシミュレーションを行う際に生じる問

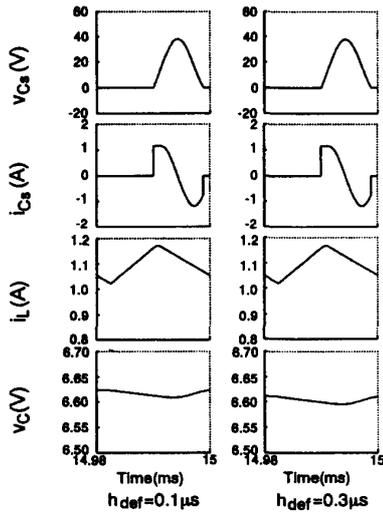


図18 提案手法による図15の共振形回路のシミュレーション波形

題を示し、スイッチング電源の解析に適したシミュレータを提案、試作して昇降圧形 DC-DC コンバータ、昇降圧形電圧半波共振方式 DC-DC コンバータにシミュレーションを行った。これにより、短時間で精度の良い結果が得られた。これらを要約すると以下のようになる。

- (1) PSpice は、実験に近い詳細な解析を行うことができるが解析時間は非常に長い。
- (2) PSIM は、回路動作を短時間で確認することができるが固定ステップであるため精度が悪く、精度の良い結果を得るためには非常に細かい計算ステップ幅が要求される。この場合、解析時間は長くなる。
- (3) 提案するシミュレータは、ステップ幅が状態遷移時に自動的に変化し部分的に詳細な解析を行うため、基本ステップ幅を大きくとることが可能であり、解析の高速化と高精度な解析の両立が可能である。

ある。

- (4) 提案するシミュレータを用いて昇降圧形 DC-DC コンバータのシミュレーションを行った場合、計算ステップ幅を大きくしても非常に高い精度であり、PSIM に比べて約 5 % から 26 % の時間で高速に解析が行えることを確認した。又、共振形に適用した場合、約 40 % の時間で良好な結果が得られた。

今後、回路構成が更に複雑となるハーフブリッジ形回路や制御回路が加わった回路について検討する予定である。

### 参 考 文 献

- (1) R.C.Wong, H.A.Owen and T.G.Wilson, "An efficient algorithm for the time-domain simulation of regulated energy-storage dc-to-dc converters," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. PE-2, pp.154-168, April, 1987.
- (2) B.K.H.Wong and Henry Shu-hung Chung, "An efficient technique for the time-domain simulation of power electronic circuits," IEEE Trans. on Circuits Syst. I, vol.45, pp.364-376, April, 1998.
- (3) H.Jin, "Behavior-mode simulation of power electronic circuits," IEEE Trans. on Power Electronics, vol.12, pp.443-452, May, 1997.
- (4) "MicroSim PSpice A / D回路解析 リファレンスマニュアル バージョン8", マイクロシム・ジャパン株式会社, pp2-24-2-63, 1998.
- (5) 内田, 石塚, 黒川, 松尾: 「スイッチング電源回路のための状態遷移に基づく高速シミュレーション」, 平成12年電子情報通信学会総合大会, SB-7-2 (2000).