

パワーエレクトロニクスに向けた回路シミュレータの開発

谷澤 之彦*

Development of the Circuit Simulator for Power Electronics.

by Yukihiro TANIZAWA

Use of simulator (ex. SPICE) for the circuits design is progressing in the fields of semiconductor circuits and the integrated circuits. Also in a power-electronics field, it can be used for a check of circuit topology and design of the control parameters in development of the switching circuits, such as the inverter / converter systems. In this paper, we proposed simple switch-selecting algorithm and developed the circuit simulator for the switching circuits analysis with easy operations and high-speed executes.

key words: circuit simulation, transient analysis, Power Electronics, ideal switching

1. はじめに

回路デザインにおけるシミュレータの利用は、SPICE系シミュレータを中心に、半導体をはじめとする電子回路分野で実用化がなされてきた。パワーエレクトロニクスの分野においても、インバータやスイッチング電源の高機能化に伴い、回路や制御は複雑になっており、その開発や設計に役立てることができる。EMTP, SABER, PSIMなどのパワーエレクトロニクス用途に特化したシミュレータも開発されている。

それらは大きく2種類あり、実際のデバイスの特性の近似により詳細な回路動作の解析を行うものと、スイッチデバイスを理想スイッチとして近似して高速に演算を行うものがある。

前者のタイプでは、精度の高い解析を行うことができる。しかし、デバイスの状態が頻繁に変化するスイッチング回路を含む回路解析では、近似のための反復演算のために、演算に長時間かかっ

たり、場合によっては収束問題が解決できずシミュレーションができない場合もある。

逆に、後者のタイプでは、スイッチングに伴う収束問題が起こりにくい。実機との差はあるものの、高速に演算ができる。

しかしながら、回路トポロジーの確認や制御系の設計には、精度よりもスイッチ動作の正確さが要求される場合が多く、このタイプのシミュレータも、開発ツールの一つとして重要である。

そこで本研究では、パワーエレクトロニクス回路に向けたシミュレータの開発を目的に、以下の特徴を持つシミュレータの作成を行った。特に、スイッチ処理には、簡単かつ単純な選択アルゴリズムを用いて、正確なスイッチングと高速な演算を試みた。

- ① 回路図通りの動作解析
- ② 正確なスイッチ動作
- ③ 高速解析
- ④ 制御回路の入力の単純化
- ⑤ ユーザーによる部品の作成

* 金属センター研究グループ

2. プログラムの構造とアルゴリズム

2. 1 プログラムの構造

解析は、図1のフローに従って行う。微小な時間ステップ Δt 毎に回路方程式を解いていく、これを解析終了時間 t_{end} まで繰り返す。

本シミュレータでは回路を主回路部と制御回路部に分け、それぞれ回路部品と制御部品を用いて構成している。そこで、1ステップ中の計算は、最初に制御部の演算をしてから、枠中に示す主回路部の計算を行っている。

このため、制御部と主回路の間に、1ステップの時間差が構造的に生じてしまう。フィードバック制御などを行う場合は、これによる影響を少なくするためには、 Δt を小さくする必要がある。通常は、 Δt を、制御周期と回路時定数のいずれか短い時間の $1/10 \sim 1/100$ 程度に取ることで、この影響は無視できる。

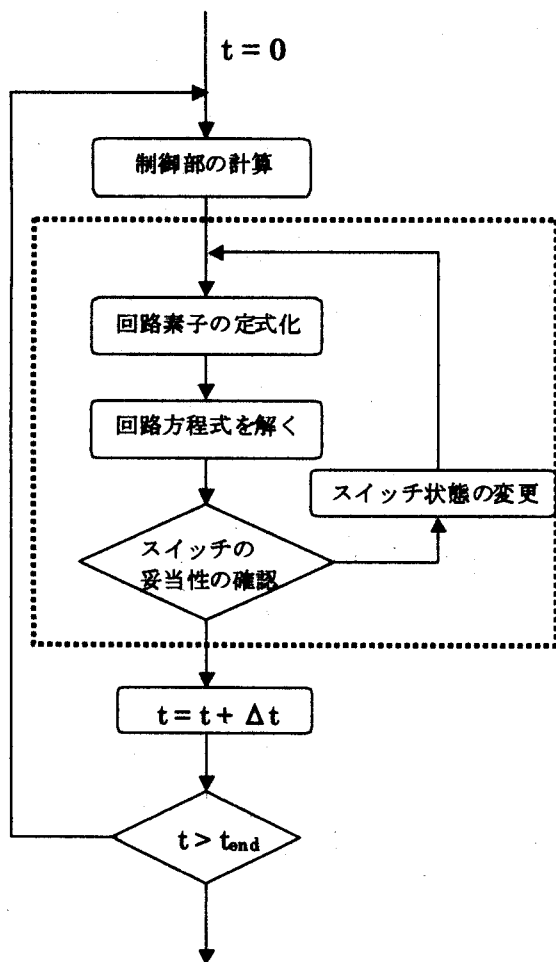


図1 フローチャート

2. 2 計算アルゴリズム

2. 2. 1 定式化法

SPICEをはじめとして多くの解析プログラムで採用されている節点解析法で行う。

2. 2. 2 積分法

ここでは、オイラー法を用いて数値積分を行っている。解析精度はトラペゾイド法 (TR法) やルンゲクッタギル法などに比べると劣るが、TR法ではスイッチングの際に解析電圧・電流が振動的になる要因となることが知られている。本シミュレータの目的である正確なスイッチの解析にはオイラー法が最も扱い易いと判断した。

計算精度については、ステップを細かくすることで改善できる。また、スイッチング回路においてはスイッチング周波数が、回路時定数よりも高い場合が多い。したがって、ステップ時間は、回路時定数よりもSW周波数に依存するので回路時定数に比べて小さな値となる。そのため、オイラー法でも大きな誤差にはならないと考えられる。

2. 2. 3 スイッチデバイスの処理法

1章で述べたように、SPICE等の汎用のシミュレータではスイッチ素子の特性 (図2 a) を詳細に近似できる。

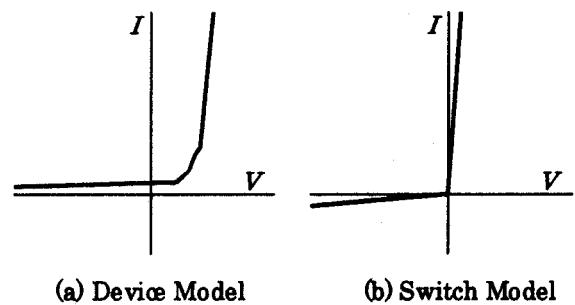


図2 V-特性カーブ

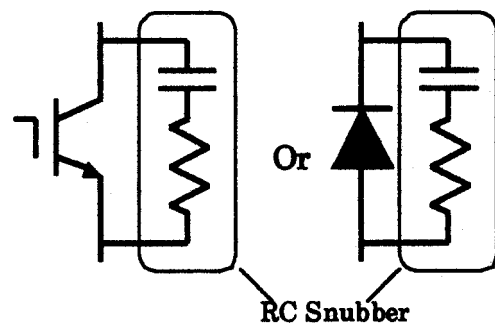


図3 スナバ回路

しかし、これらでは状態が大きく変化するスイッチング時にステップを細かくしなくてはならず、計算時間が長くなる。特に、複数のスイッチが同時に変化する場合は、収束性の問題のために、解析精度パラメータの調整や、スイッチ素子にスナバ回路(図3)を付加したりしなくてはならない。

そこで、本シミュレータでは、簡単のためにスイッチ素子は抵抗(R_{on} , R_{off})を持ったスイッチとして扱う(図2b)。また、スイッチング状態の決定は、ゲートと両端電圧から状態を決定してエラーモードが生じないように選択を行う(図1)。この手法により、関数近似のための反復演算が要らないので計算量を少なくできる。また、収束性の問題が生じないので、スナバ回路も必要ない。

図4のチョップ回路を用いて、スイッチ時の計算法を説明する。図5は、スイッチング時のトランジスタS1の電流およびCE間電圧波形を示す。チョップ回路は、時刻 t でトランジスタS1がオフし、同時にダイオードD0がオンして電流の経路が①から②に変わるものとする。図5(a)は、理想的な場合の波形である。

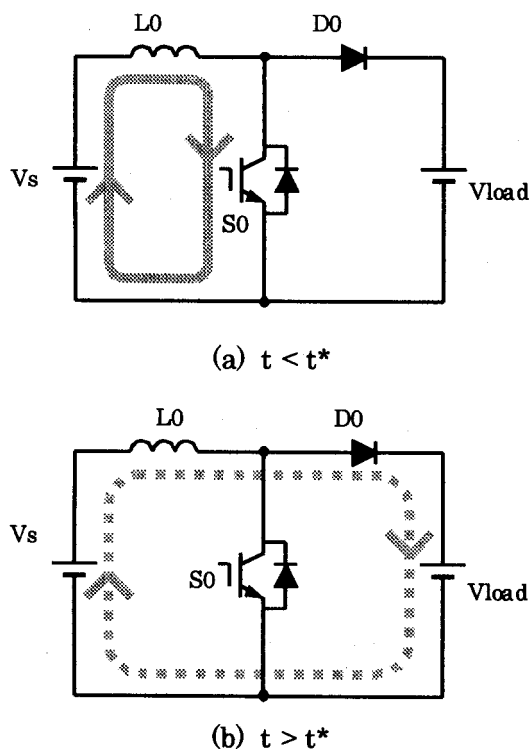


図4 チョップ回路

シミュレータでは、計算ステップ Δt 毎に解を求めて行うので、手法1で行うとスイッチング時に1ステップだけ電流が負に流れてしまう。これにより、インダクタに大きな電圧が発生する。このため、これを回避するためにスイッチ素子と並列にRCスナバ回路を取りつける対策が多く用いられる。しかし、このスナバを付ければそれだけ部品点数が増えるので入力の手間や計算量が増える。

そこで、本シミュレータでは、図1点線枠部のフローで計算を行う。スイッチの論理エラーが発生したら、1ステップ前の時間に戻ってスイッチ状態を変更して計算をやり直す方法で行っている。これにより、スイッチ論理の矛盾を回避できるので、不正なモードに起因する異常電圧が発生しない。

電圧電流波形は、図4(c)のようになり、電流

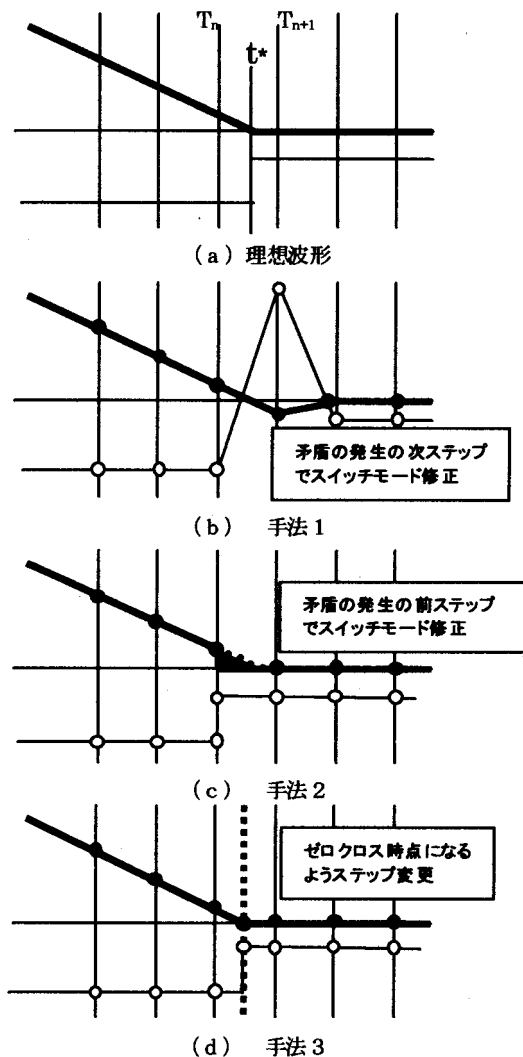


図5 スwitching時の波形

のゼロクロス前にスイッチ状態を切り替えている。

ただし、固定ステップでの演算は、スイッチングのたび図中斜線部の誤差が生じてしまう。このため、手法3のようにゼロクロスを求めて再計算する方法も考えられる。しかし、ここでは簡単のために手法2を用いる。この方法でも、ステップが小さい場合は、大きな誤差を生じることはない。

3. 解析例および動作確認

図6に示す3相インバータによる誘導モータ駆動を例に挙げ、解析を行って本プログラム動作の確認を行った。ここでは本プログラム解析手順もあわせて説明する。表1に解析する回路および解析条件の諸元を示す。

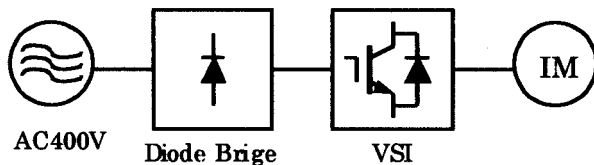


図6 解析回路単線図 (PWMインバータ)

表1 諸元

回路パラメータ	電源	3相400V
	スイッチパターン生成法	空間ベクトル変調
	スイッチング周波数	2 [kHz]
	電圧制御率	0.8
	直流リアクトル	1 [mH]
	直流コンデンサ	750 [μ F]
	負荷電動機パラメータ	
	R1	0.1253 [Ω]
	L1	0.00078 [H]
	R2	0.1852 [Ω]
	L2	0.00132 [H]
	M	0.02710 [H]
	pole	2
	モータ軸イナーシャ	0.401 [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
負荷トルク	64 [$\text{N}\cdot\text{m}$]	
解析設定	解析時間	1 [s]
	解析ステップ	1 μ [s]
	スイッチ抵抗	Ron: 1mW Roff: 1MW

3. 1 主回路の入力

回路の入力は、専用のCADを用いて、回路図を描くように行う(図7)。コンバータはダイオード整流器とし、直流電圧平滑のためのC, Lを付加している。インバータはトランジスタブリッジで構成する。

誘導モータは、等価モデルによって大きく変わるので、本シミュレータでは標準の部品としていない。今回はT型等価モデルをとって、3.3項で説明するようにプログラムにより記述している。

3. 2 制御の入力

制御回路の表現法は、回路部品を組み合わせて構成する方法、制御ブロックによる表現、およびプログラムによる表現法のいずれかもしくは組み合わせて入力する。ここでは、空間ベクトル変調(SVM)によりゲート信号を発生させてスイッチの制御を行う。

まず、基準電圧指令 $[0.8 \cdot \sin(\omega t + \phi)]$ とスイッチング周波数指令 $[2\text{kHz}]$ を正弦波信号発生ブロックおよび信号発生器で作る。基準電圧は、 α β 座標変換器でd軸およびq軸電圧指令値に変換する。指令電圧と、スイッチング周波数をSVMブロックに入力して、各スイッチのゲート指令を出力する。

α β 変換器およびSVMパターン発生器は制御要素部品で構成するよりも、プログラミング言語を用いて動作を記述する方が容易であるので、4.3項に示すように、動作は、C言語で記述している。

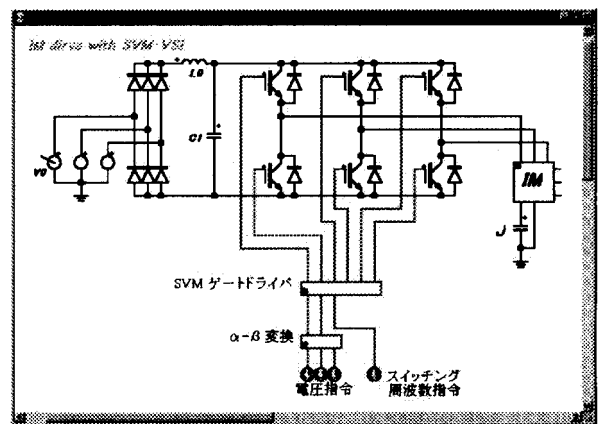


図7 回路入力画面

3. 3 特殊部品のユーザーによる作成

インバータなどの制御回路は、複雑な回路構成となるので、回路で記述しては煩雑である。そこでC言語で記述し、ユーザーが自由に作成できるように配慮してモデリングを簡便に行えるようにしている。また、コンパイルして用いるので、解析速度の向上にもなる。

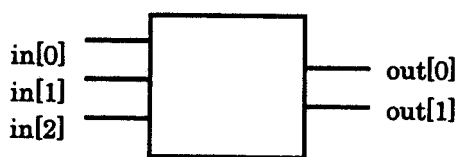
回路素子についても同様に、C言語で記述してユーザーが自由に作成が行えるようにしている。これにより、特殊な動作の部品、例えば、モーターや掛け算等の演算器、サンプルホールドなどを自由作成ができる。

ここでは、 $\alpha\beta$ 変換器とSVMパターン発生器および誘導モーターを作成している。例えば、 $\alpha\beta$ 変換器の場合は、図8 aのように入出力の関係を記述する。コードは表2の通りである。同じ処理をブロックで記述した場合より1.5倍程度高速に行える。

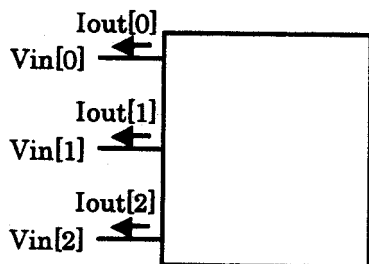
回路部品については図8 bのように電圧入力・電流出力の素子として記述をおこなう。なお、コードはVisualC++³⁾を用いてDLL化して利用する。

表2 $\alpha\beta$ 変換器のコード

```
int ABCONV ( )
{
out[0] = sqrt(2./3.)*( in[0] - in[1]/2. - in[2]/2.);
out[1] = sqrt(2./3.)*(sqrt(3.)/2.*( in[1] - in[2] ));
return 0;
}
```



(a) Control Block Model



(b) Circuit parts Model

図8 ユーザ部品のモデル

3. 4 解析

以上のように入力した回路は、解析プログラムにネットリストとして渡され解析を実行し、結果をディスプレイとファイルに出力する。図9では、0.4秒でほぼ定常状態に到達し、モータ回転数が定格に到達し、モータトルクも負荷トルクに一致しており、良好に解析が行えている。

また、図10に、時刻0.4~0.405秒における電源電流 I_u とモータの線間電圧 V_{ab} および線電流 I_a の波形を示す。各波形共に、異常電圧も発生しておらず、スイッチングについても良好に行えている。他にも、スイッチング電源やコンバータ回路、共振スイッチング回路などの解析を試みたが、いづれも良好な結果が得られた。

今回は、波形からしか動作確認を行っていない。数値的な検討は今後行いたい。

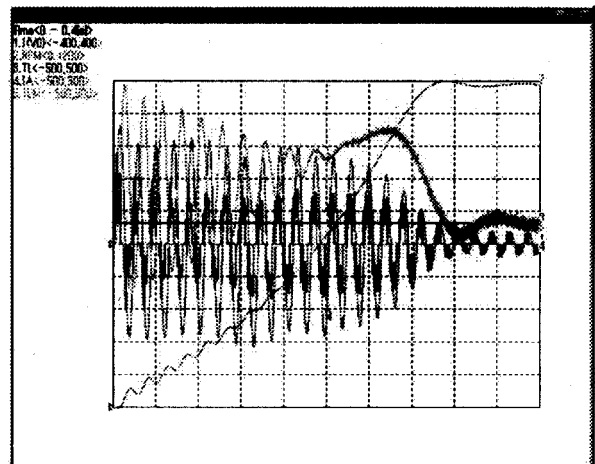


図9 シミュレーション結果表示画面

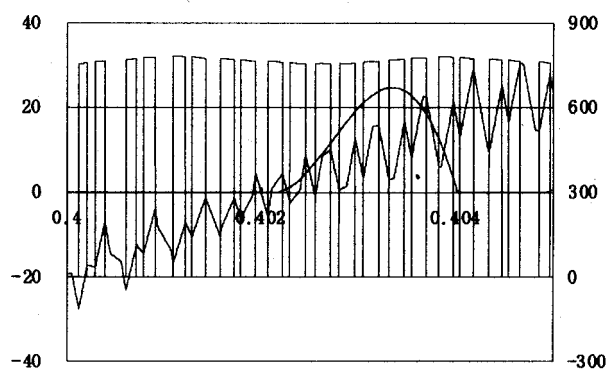


図10 シミュレーション結果

3. 5 解析速度比較

既報¹⁾にあるベンチマーク回路Ⅰ,Ⅱと、回路ⅠのLR負荷を表1のモータ負荷に変更したものを評価回路Ⅲとして解析速度の比較を行った。

計算には、CPU:CELERON500MHz MEMORY:64MB OS:Windows98 のパソコンを用いた。使用したシミュレータは、PSPICE評価版⁴⁾・PSIM^{2) 5)} 評価版である。PSPICE (Cadence Design System社)は、現在最も多く普及しているSPICE系のシミュレータである。今回は、スイッチ素子に簡易モデルSbreak・Dbreakを使用した結果を示す。

PSIM (Powersim社)は、パワエレクトロニクス用のシミュレータである。本プログラムと同様な性格を持つ製品である。

結果を、表3に示す。汎用性と精度の高い解析が行えるSPICEは、もっとも解析時間が長かった。PSIMと本シミュレータではほぼ同様な解析時間となった。回路Ⅲについては、PSIMに対して2倍以上早い結果が得られた。これは、モータモデルの差によるものと考えられる。

なお、この比較は筆者らが行ったもので、解析時間は、回路や制御系のモデル方法、解析パラメータの設定方法によって大きく変わる。この結果が各製品の最速値であるとは限らないことを申し添えておく。

表3 解析時間

シミュレータ名	評価回路Ⅰ	評価回路Ⅱ	評価回路Ⅲ
本シミュレータ	15sec	1sec	17sec
PSPICE	32sec	15sec	-
PSIM	11sec	1sec	42sec

4. まとめ

今回開発したシミュレーションプログラムは、電力変換器等のスイッチング回路の過渡解析を目的に作成をした。スイッチ素子(ダイオード、ト

ランジスタ、サイリスタ)を、ON/OFFスイッチとして扱い、また、簡単なスイッチの状態決定アルゴリズムを用いることにより、高速かつ正確な動作解析を行うことができた。

実用性については、簡易CADにより回路入力を行うことができ、また、回路素子や制御部をユーザーがC言語をもちいて追加できるので、自由度と利便性を確保できたと考えている。特に、本プログラムでは、解析のための設定を必要としないので、回路シミュレータ初心者にも容易に利用できるものと思われる。

今後は、計算アルゴリズムの適用限界、および解析精度に関する検討とGUIの改良を行う必要がある。

謝 辞

本プログラムは、岐阜大学村井研究室で開発されたものを元にして製作したものである。故村井由宏教授に感謝を申し上げますとともに、ご冥福をお祈りいたします。

参考文献

- 1) “パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーション技術”, 電気学会技術報告No.761, 2000
- 2) H.Jin, “Behavior-Mode Simulation of Power Electronic Circuits”, IEEE Trans., vol.12, No.3, 1997
- 3) MS-Visual C++ 4.0 Microsoft社
- 4) PSpice Cadence Design System社
- 5) PSIM Powersim社

なお、本プログラムは試作段階であるがHPにて公開をしています。ご興味のある方はご覧ください。

[アドレス: <http://www.mie-iri.tsu.mie.jp>]