

# パワーエレクトロニクス向け回路シミュレータの開発と解析事例

谷澤之彦\* , 石川裕記\*\*

Development of Circuit Simulator for Power Electronics System.

by Yukihiro TANIZAWA, Hiroki ISHIKAWA

This paper describes a transient analysis programs “TOKUZO” for design and analysis of power electronics circuits. The simulator dispenses with dummy resistors, which are sometimes required in ATP/EMTP and other circuit simulators for damping nonexistent oscillations in numerical calculation. This makes quite user friendly. Other features are as follows; turn-on and -off instants of switching elements are precisely determined. Benchmark tests are carried out on the test circuits provided by IEEJ. Comparison of the resulting waveforms by “TOKUZO” with those by theoretical analysis is made. Good agreement between them establishes the reliability of “TOKUZO”.

Key words: simulator, power electronics systems, switching logic

## 1. はじめに

インバータ・コンバータ等の電力変換回路を含むパワーエレクトロニクスシステム（以下、PESと略記）が様々な分野に適用されている。PESには、電気エネルギーを機械や熱など様々な形態のエネルギーに変換する負荷、及び、これらの制御回路などが含まれる。これらシステム全体での解析や設計に際し、コンピュータシミュレーションが不可欠となっている<sup>(1)</sup>。

電力変換回路はスイッチング素子を含み、そのスイッチング動作によって電流経路が様々に変化する。そのため、プログラミング言語で回路方程式等を記述してシミュレーションを行う場合、スイッチングに基づく回路動作モードをすべて抽出する必要がある。しかしながら、電力変換回路にオン・オフともに制御できないダイオードや、オフが制御できないサイリスタなどが含まれる場合、これらのスイッチング状態をほかの回路素子の電流、電圧に基づいて把握しなければ、すべての動

作モードの抽出はできない。そのため、スイッチング素子のオン・オフの自動判別機能を持つ回路シミュレータが望まれている。

現在、PESの開発や解析などに、さまざまな回路シミュレータが広く用いられている<sup>(2)</sup>が、それらには、以下の問題点が指摘されている。

- ・数値振動抑制のため、本来必要でないスナバやダンピング抵抗（ダミー抵抗）などを個々の回路素子に付加せざるを得ないこと
  - ・解析対象の回路の伝達関数モデル化が必要
  - ・スイッチング解析時における解析値の収束性
- これらの問題は、回路記述の複雑化や実行時間の増大を招き、解析結果の精度にも問題が生じることがある。

そこで、筆者らは、電力変換回路の開発やその制御系設計を目的として使用するための回路シミュレータ「TOKUZO」を開発した<sup>(3)</sup>。スイッチング処理には、簡単な選択アルゴリズムを用いて、スイッチング素子にダミー抵抗などを付加しなくても正確なスイッチングと高速な演算が行えるようにした。

本論文では、「TOKUZO」のアルゴリズムの要

\* 金属研究室研究グループ

\*\* 岐阜大学工学部

点について述べる。また、「TOKUZO」の解析性能を検証するため、「電気学会パワーエレクトロニクスシステムのモデリングとシミュレーション技術共同研究委員会」により提唱されているベンチマーク用回路<sup>(2)(4)~(6)</sup>（単相半波整流回路，チョップ回路）を用いてベンチマークテストを行い，ATP/EMTP の解析結果および理論計算と比較した。

## 2. アルゴリズム

「TOKUZO」の解析アルゴリズムについて述べる。解析フローを図1に，解析手法を表1に示す。微小な計算刻み幅  $\Delta t$  毎に回路方程式を解いて回路の電流電圧を得る。これを解析終了時間まで繰り返す。

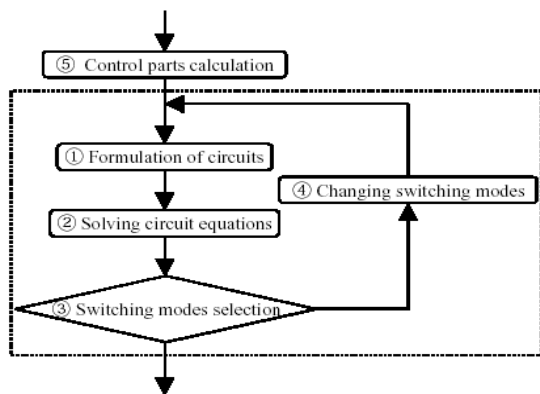


図1. 解析フローチャート

表1. プログラムの解析法

Numerical integration	Backward Euler
Formulation	Node analysis method
Time step	Fixed (assignment)
Switching element	Resistor (Ron, Roff)
Decision of switching	Switching logic matching without zero point compensation

トランジスタ，サイリスタ，ダイオード等のスイッチング素子の処理について，「TOKUZO」では，抵抗 ( $R_{on}, R_{off}$ ) を持つ理想スイッチとして扱う。スイッチのオン・オフ状態の妥当性は，図1の解析フローチャート内の点線枠部にて決定する。図中⑤のブロックで，制御部の演算を行い，これをふまえて図中②のブロックで回路方程式を解く。得られた解に基づいて③のブロックでスイッチング状態の妥当性を判断する。

表2にスイッチのオン・オフ状態とスイッチの両端電圧との関係を示す。③のブロックで，表2に対し矛盾すると判断した場合，スイッチの論理エラーと見なして，スイッチング状態を④のブロックで修正し，回路計算を再度行う。これをスイ

表2. スwitchの状態と電圧の関係

	ON	OFF
Diode	$V_{AK} > 0$	$V_{AK} \leq 0$
Transistor	$V_G > 0$ and $V_{CE} > 0$	$V_{CE} \leq 0$

$V_{AK}$ : diode voltage across anode and cathode

$V_{CE}$ : transistor voltage across collector and emitter

$V_G$ : gate signal

ッチング論理にエラーが無くなるまで繰り返すことで，スイッチング論理の矛盾を回避し，正当なスイッチング状態を選択できる。これにより，不正なスイッチングモードに起因する異常電圧の発生がない。

## 3. ベンチマークテスト

「TOKUZO」の解析性能を検証するため，他のシミュレータおよび理論計算との比較を行った。比較シミュレータは ATP/EMTP (MINGW32) とした。解析対象の電力変換器は「電気学会パワーエレクトロニクスシステムのモデリングとシミュレーション技術共同研究委員会」により提唱されているベンチマーク用回路（単相半波整流回路，チョップ回路）を用いた。解析にあたり，CPU が Pentium III，クロック 500MHz，OS は Windows 2000 の計算機を使用した。

### 〈3. 1〉単相半波整流回路

図2に単相半波整流回路を，表3にベンチマーク用回路定数を示す。この回路の動作モードは以下の2つに分けられる。

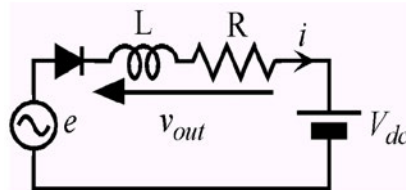


図2. 単相半端整流回路

表3. 回路定数

e	100Vrms	L	10mH
Vdc	20V	R	100Ω

モード1:

ダイオード通電モードである。交流電圧源  $e$  が直流電圧源  $V_{dc}$  より大きくなると，ダイオードに順方向電圧が印加され，導通する。この時の回路方程式は，次式で示される。

$$e = L \frac{di}{dt} + Ri + V_{dc} \quad \dots (1)$$

出力電圧  $v_{out}$  およびダイオード電圧  $v_{di}$  は，

$$V_{out} = e - V_{dc}, \quad V_{di} = 0 \quad \dots (2)$$

で表される。i が負になるとダイオードがオフし、モード2に移行する。

モード2：

ダイオードがオフであるので i, v<sub>out</sub> および v<sub>di</sub> は、次式で示される。

$$i = 0, \quad V_{out} = 0, \quad V_{di} = e - V_{dc} \quad \dots (3)$$

図3にATP/EMTPにより回路図通りの結線を行って求めた出力電圧の解析結果を示す。ダイオードは、TYPE11を使用し、計算刻み幅Δtは1μsecとした。半波整流の波形が得られず、波形が塗りつぶされた部分で振動を生じている。

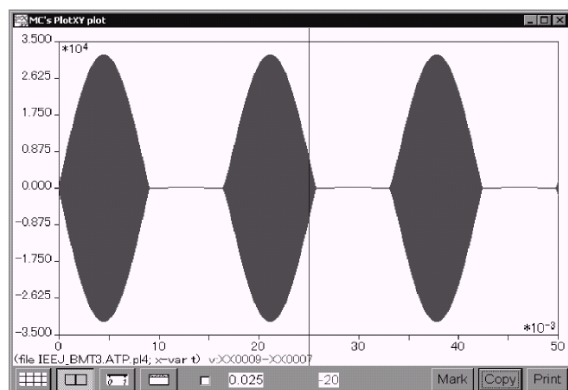


図3. ATP/EMTPによるVoutの解析結果

ATP/EMTPでは、(なるべく)正しい結果を得るため、スイッチやインダクタンスなどの回路素子に、実際には存在しないダミー抵抗R<sub>d</sub>を付加する必要があることはよく知られている<sup>7)</sup>。この回路では、図4に示すようにR<sub>d</sub>(15kΩ)を挿入する。このR<sub>d</sub>の要・不要や、その値などには一定の基準があるわけではなく、ノウハウとしての経験に大きく依存する。このことがATP/EMTPの使い勝手を悪くしている。

「TOKUZO」ではダミー抵抗は不要であるため、回路図どおりに結線すればよい。図5に結線図の入力ウィンドウを示す。

図6に回路電流iおよび出力電圧v<sub>out</sub>の解析結果を示す。計算刻み幅ΔtはATP/EMTPと同じ1μsecとした。「TOKUZO」ではダミー抵抗がなくても、理論値によく一致した結果が得られた。

次に、ダイオードのスイッチング動作を確認するため、ダイオードのターンオン時の拡大波形を図7に示す。(a)はATP/EMTP、(b)は

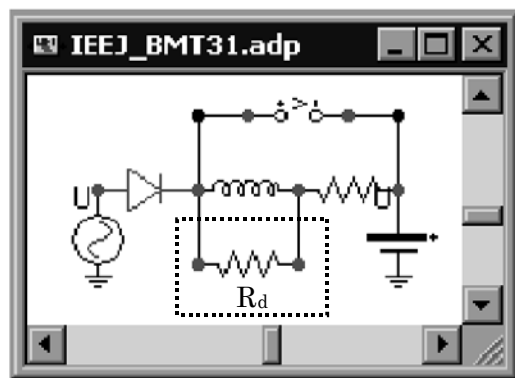


図4. ATP/EMTPの回路入力画面(ATPDRAW)

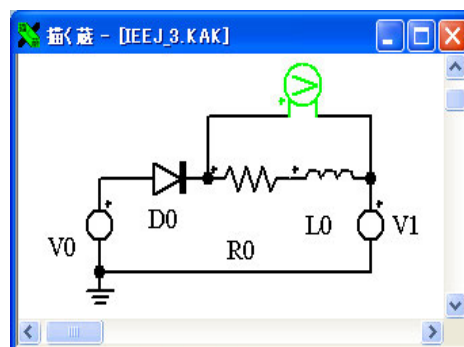


図5. 単相半端整流回路の入力画面(TOKUZO)

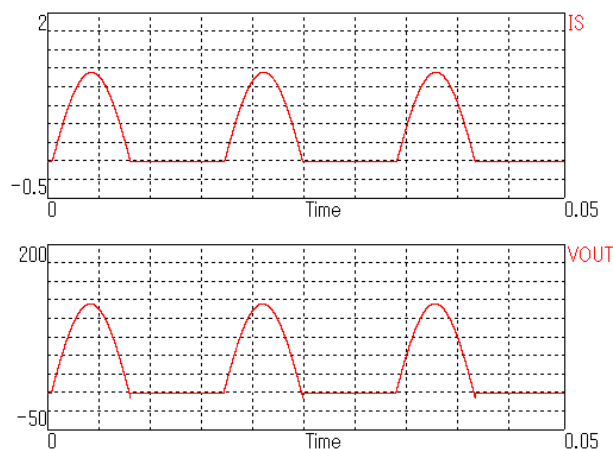
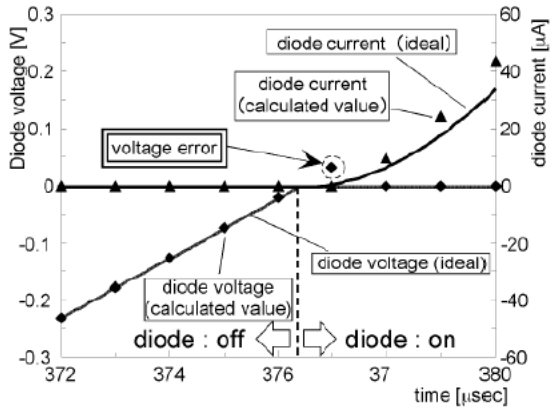


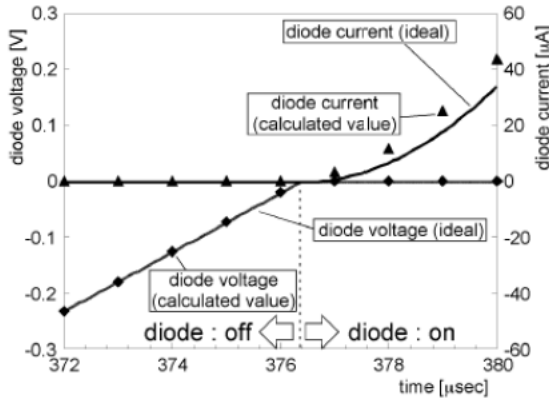
図6. 「TOKUZO」での解析結果

「TOKUZO」における解析結果で、いずれも実線はダイオード電流およびダイオード電圧の理論値、▲はダイオード電流の解析値、◆はダイオード電圧の解析値を示す。

ATP/EMTPでは、ダイオードオフ時は電流、電圧共に精度よく解析できているが、ダイオードがオンした後、ダイオード電流に数~数十μA程度の誤差がある。この誤差は、計算刻み幅Δtをより細かくすれば、小さくすることができる。一方、ダイオード電圧はオン直後に正の電圧が発生している。これは、ダイオードのスイッチング状態がΔt前の回路状態によって決定されるため<sup>4)</sup>



(a) ATP/EMTP



(b) 「TOKUZO」

図 7. ターンオン時のダイオード電流・電圧

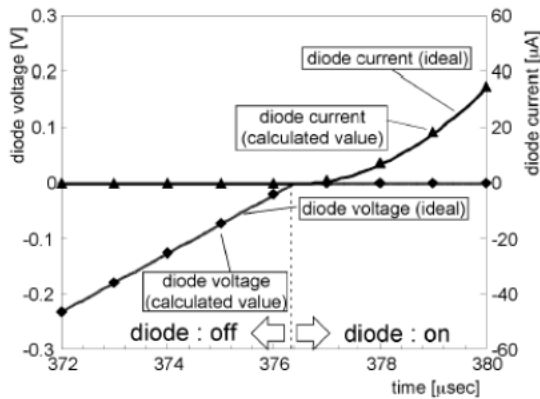


図 8. ターンオン時のダイオード電流・電圧  
( $\Delta t=0.1 \mu \text{ sec}$ , TOKUZO)

で、 $\Delta t$  を小さくしても、値は小さくなるが正電圧の発生自体は回避できない。

「TOKUZO」の場合、ATP/EMTP の解析結果で見られた電圧誤差は生じない。2 章で述べたように、ダイオードのスイッチング状態を同一の計算ステップで決定するためである。ダイオードオン後のダイオード電流は ATP/EMTP の解析結果と同様、数～数十  $\mu \text{ A}$  程度の誤差が生じているが、計算刻み幅  $\Delta t$  をより細かくすれば、小さくすることができる。図 8 に  $\Delta t$  を  $0.1 \mu \text{ sec}$  とした場

合のターンオン時のダイオード電圧および電流を示す。図 7(b)で見られた電流誤差が非常に小さくなっていることが分かる。ATP/EMTP でも電流誤差に対しては同様の結果が得られた。

上述の ATP/EMTP における電圧誤差は非常に小さいため、PES の設計や動作確認などのための解析を行う際にはほとんど支障はない。しかし、

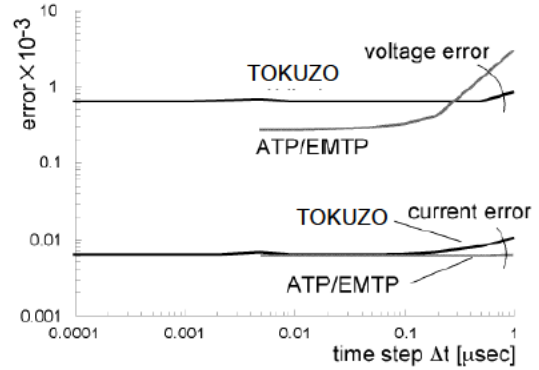


図 9. 解析精度の比較

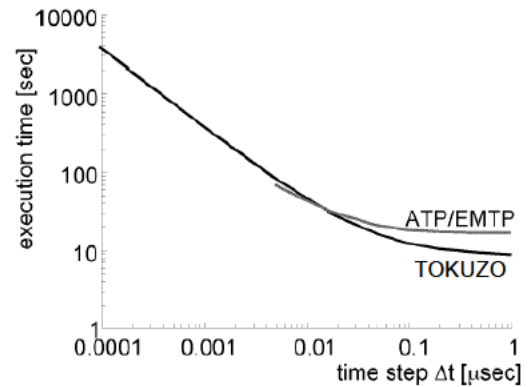


図 10. 解析時間の比較

詳細な回路モードの検討を行う場合には、実際のモードと異なるため問題となる。

図 9 に「TOKUZO」と ATP/EMTP の計算刻み幅  $\Delta t$  に対する誤差特性を示す。誤差  $\Delta_{err}$  は次式で定義した。

$$\Delta_{err} = \frac{1}{T} \int_0^T |x_{ideal} - x| dt \quad \dots (4)$$

ただし、 $T$ : 交流電圧源の 1 周期、

$x_{ideal}$ : 理論値、 $x$ : 解析値

$\Delta t$  を小さくすると、いずれの場合も誤差は当然小さくなるが、あまり細かくしてもそれほど効果がないことが分かる。 $\Delta t$  に対する計算時間の特性を図 10 に示す。計算時間には、実用を考慮してデータ保存時間も含めた。データ保存は  $1 \mu \text{ sec}$  毎とした。ただし、ATP/EMTP の場合、データ保存間隔の都合上、 $\Delta t$  は  $50 \text{ nsec}$  以上とした。

$\Delta t$  が約  $0.1 \mu\text{sec}$  以上で「TOKUZO」の方が 2 割程度計算時間が短い. 図 9, 図 10 より, 図 2 の回路の場合,  $\Delta t$  は  $0.1 \mu\text{sec}$  程度でよい.

### 〈3. 2〉チョップ回路

図 11 にチョップ回路, 表 4 にベンチマーク用回路定数を示す. 制御ロジック, 制御パラメータおよび指令値  $i^*$  はベンチマークテストで指定されたもの<sup>(5)</sup>を使用し, 電流検出器のゲインは 0.1 とした. 計算刻み幅  $\Delta t$ , データ保存間隔をともに  $1 \mu\text{sec}$  とし,  $15\text{msec}$  までの解析を行った.

ATP/EMTP ではトランジスタモデルがないため, 双方向スイッチ素子に対し, 直列にダイオード (TYPE11) を接続して一方向性のトランジスタモデルを構成した. また, スイッチング素子に TACS 制御スイッチを使用するとスパイク電流が流れる, 異常電圧が発生するなどの問題が生じた. これを回避するため, スイッチング素子に GIFU スイッチングオプションを用いた. ダミー抵抗として, インダクタンス  $L$  に並列に  $37.5\text{k}\Omega$ , ダイオードに直列に  $0.01\Omega$ , 並列に  $1\text{k}\Omega$  を付加した. 「TOKUZO」ではトランジスタモデルを使用し, 回路図どおりの結線を行った.

回路電流の解析結果を図 12 に示す. (a) が ATP/EMTP, (b) が「TOKUZO」である. それぞれほぼ同じ解析結果が得られている. 計算時間は, 「TOKUZO」が  $5.47\text{sec}$  であったのに対し, ATP/EMTP では GIFU スイッチングオプションの影響で  $51.8\text{sec}$  であった.

## 4. まとめ

電力変換器における回路動作モード, スイッチング論理の妥当性の検証, 回路定数および制御系の設計を目的として使用する回路シミュレータ「TOKUZO」を開発した.

本報では, 「TOKUZO」のアルゴリズムの要点について述べた. また, 解析性能を検証するため, 「電気学会パワーエレクトロニクスシステムのモデリングとシミュレーション技術共同研究委員会」により提唱されているベンチマークテストを行い, ATP/EMTP の解析結果および理論計算と比較した. その結果, スイッチングの整合性に関して, 同一計算ステップで判定, 補正を施しているため, インダクタンス開放などに伴う異常電圧の発生を防ぐことができること, 及び解析精度は非常に良好であり, 計算時間も格段に短縮ができ

ることを確認した.

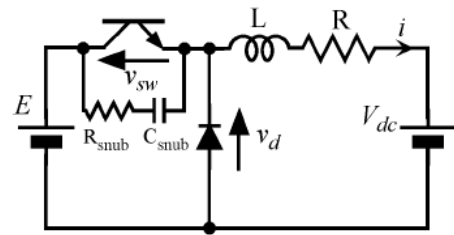
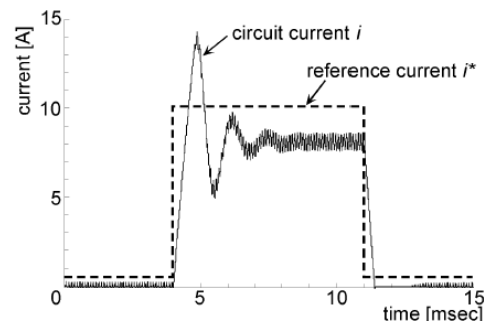


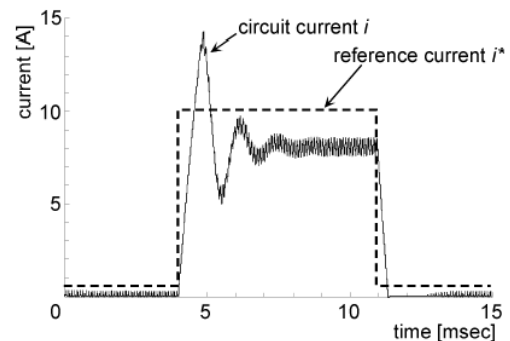
図 11. チョップ回路

表 4. 回路定数

E	100Vr	V <sub>dc</sub>	50V
L	2.5mH	R	1Ω
R <sub>s<sub>sub</sub></sub>	300Ω	C <sub>s<sub>sub</sub></sub>	0.05μF



(a) ATP/EMTP



(b) TOKUZO

図 12. 回路電流  $i$  の解析結果

## 参考文献

- 1) 黒江康明:「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の現状と課題」, 電気学会論文誌 D, Vol. 118-D, No. 7/8, pp.822-827 (1998)
- 2) 「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
- 3) 谷澤, 石川:「電力変換器に向けた回路シミュレータの開発」, 平成 14 年電気学会全国大会論文集 IV, pp.76-77, 2002

4) 木村, 庄山, 奥野 : 「パワーエレクトロニクス用シミュレータとベンチマークテスト」, 平成 13 年電気学会産業応用部門大会講演論文集 [III], pp. 1119-1122 (2001)

5) 電気学会産業応用フォーラム「パワーエレクトロニクスにおけるシミュレーション技術」追加資料集, pp.38-50, 2002

6) 電気学会パワーエレクトロニクスシステムのモデリングとシミュレーション技術共同研究委員会ホームページ,

<http://sim.power.elec.okayama-u.ac.jp/>

7) 舟木 : 「よくあるトラブルとシミュレーションのコツ. ATP」, 電気学会産業応用フォーラム「パワーエレクトロニクスにおけるシミュレーション技術」追加資料集, pp.38-50, 2002