電力系統瞬時値解析プログラムの最新動向

正 員 野田 琢*

Recent Trend of Electromagnetic Transient Programs for Power System Analysis

Taku Noda*, Member

Power system simulations are roughly classified into the two categories, effective-value-based simulations and electromagnetic transient simulations. The former are usually long-term simulations of a large power system considering the electro-mechanical dynamics and include for instance transient stability simulations. On the other hand, the latter are basically short-term simulations of a small portion of a power system, and surge simulations and power-quality simulations are included. However, for simulations which contain power-electronics controllers, electromagnetic transient simulation methods are often used even for long-term simulations.

This paper first reviews various programs for electromagnetic transient simulations, and then the recent trend of related simulation techniques is summarized.

キーワード：電力系統，瞬時値解析，解析プログラム，リアルタイム・シミュレータ，EMTP

Keywords: power systems, electromagnetic transient analysis, simulation programs, real-time simulators, and EMTP

1. はじめに

電力系統解析において，瞬時値解析という用語は実効値解析と対比して使用される。実効値解析は系統内における電圧，電流の実効値の過渡の時間変化を計算するもので，代表的なものとして過渡安定度計算がある。一方，瞬時値解析は系統内の電圧，電流の時間変化を波形レベル，すなわち，瞬時値で追って計算するものであり，具体的にはサージ計算やリレー関連の計算，電力品質の計算[†]が挙げられる。よって，実効値解析は大規模系統全体の比較的長い時間領域のふるまいを計算するのに用いられ，瞬時値解析は系統の一部分における短い時間領域の計算に適用されると考えてよい。また，通常，実効値解析では系統の正相回路のみを用いて解析を行うのに対して，瞬時値解析では詳細な三相回路を用いて解析を行う。

交流系統の解析では上記のような考え方で良いが，パワーエレクトロニクス応用機器（以降，PE 機器と略す）を含む系統の解析では，事情が異なってくる。PE 機器はスイッチング・デバイスを用いて交流 1 周期の間に多数回の電流入り切りを行うことで各種制御を行う。このスイッチングに

伴う現象は，当然，実効値の時間変化では十分に表現することができず，詳細な結果を得ようとすれば，長い時間領域の解析に対しても瞬時値解析を適用することが多くなる⁽¹⁾。また，最近では実時間で解析を行うリアルタイム・シミュレータが実用化し高速な解析が可能となってきたため，PE 機器を含まない純然たる大規模系統の解析に瞬時値解析を適用する事例もある⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では，まず実用に供されている種々の瞬時値解析プログラムを概観し，次いで，電力系統の瞬時値解析に関する最近の動向について述べる。

なお，ここで瞬時値解析という用語について注釈しておく，瞬時値解析を過渡現象解析と呼ぶ場合もあるが，過渡安定度解析と混同する恐れがあるため，本稿では瞬時値解析と呼ぶ。英語では瞬時値解析を **electromagnetic transient analysis**，過渡安定度解析を **transient stability analysis** と呼んで区別しているようである。

2. 瞬時値解析プログラム

リアルタイム・シミュレータの外見はプログラムというよりはむしろ装置（ハードウェア）であるが，装置の中で瞬時値解析プログラムが動いている点で本質的には瞬時値解析プログラム的一种である。本稿では，実時間処理を行わない通常の瞬時値解析プログラムをオフライン・プログラムと呼ぶことで，リアルタイム・シミュレータと区別する。本稿で触れる瞬時値解析プログラムの一覧を表 1 に示す。

〈2・1〉 オフライン・プログラム 電力系統の瞬時値解

* (財) 電力中央研究所 電力技術研究所
〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
Electric Power Engineering Research Lab., CRIEPI
2-6-1, Nagasaka, Yokosuka 240-0196

[†] 高調波計算，瞬時電圧低下計算，突入電流計算，異常共振現象計算，分散電源連系関連の計算など。

表 1 瞬時値解析プログラムの一覧

Table 1. List of electromagnetic transient programs.

off-line programs	real-time simulators
ATP	ARENE
DCG EMTP V1~3	ARTEMAC
EMTDC/PSCAD	FlexRS
EMTP-RV	Hypersim
MicroTran	RTDS
NETOMAC	

(in alphabetical order)

析に最もよく用いられているプログラムがEMTP (Electro-Magnetic Transients Program) であることに異論は無いだろう。EMTP は 1960 年代後半よりミュンヘン工科大学の博士課程の学生であった H.W. Dommel 氏によって開発が始められ、後に米国エネルギー省 BPA (Bonneville Power Administration) において大幅な機能拡張が行われた⁽⁴⁾。1982 年までに Mode 1 から Mode 42 が開発され (Mode はバージョンの意味)、米国政府の情報公開により無償で配布された結果、世界中に広まった。1982 年には BPA の開発資金投資の縮小を受け、EMTP DCG (Development Coordination Group) が発足し、国際共同開発の形態となって配布が有償化された。しかし、一方で有償化に反対したグループが ATP (Alternative Transients Program) として BPA のコードを元に無償配布版の開発を開始した。また、あまり知られていないが Dommel 氏自身が British Columbia 大学に移籍してから完成させた比較的小規模の解析のための MicroTran⁽⁵⁾がある。以上より、開発が継続されている EMTP 系のプログラムには DCG EMTP, ATP, MicroTran の 3 つがあることになる。DCG EMTP は BPA で開発されたコードを元に Ver. 1~3 (以降、V1~3 と記す) が開発されたが、その後、最新の解析技術を取り入れコードの保守性を向上するため全てのコードを完全に書き直した EMTP-RV⁽⁶⁾⁽⁷⁾が開発された。RV は再構築 (restructuring) の結果生まれたバージョンという意味である。ATP については、BPA のコードを元にした開発が継続されているようである⁽⁸⁾。

EMTP 以外で実用に供されている瞬時値解析プログラムとしては、カナダの電力会社 Manitoba Hydro で D. Woodford 氏により開発された EMTDC/PSCAD⁽⁹⁾が有名である。直流送電 (DC) を得意分野とするというネーミング通り、スイッチング・デバイスの取り扱いに工夫が施されている。また、独 Siemens 社で開発された NETOMAC (NETwork TOrsion MACHine Control)⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾や、独 DIgSILENT 社の DIgSILENT PowerFactory (Digital Simulator for Electrical Network)⁽¹²⁾も実用に供されている。S.N. Talukdar 氏によって開発された METAP (Modular and Expandable Transient Analysis Program)⁽¹³⁾は文献では知られているが、筆者が知る限り実用的に利用されているという情報は無い。なお、DIgSILENT PowerFactory と METAP については情報が少ないため、次節以降の解説から除外する。

〈2・2〉 リアルタイム・シミュレータ リアルタイム・

シミュレータは実時間と同期して瞬時値解析を実行できるため、あたかも実系統に接続しているかのような状況を作り出してリレーや機器制御装置の試験を行うことができる。すなわち、被試験装置が接続される電力系統をリアルタイム・シミュレータ上で模擬することにより、シミュレーションの結果得られた電圧・電流等の瞬時値量を D/A コンバータにより被試験装置に渡し、逆に被試験機器が発した制御信号を A/D コンバータ等によりリアルタイム・シミュレータ上の電力系統に戻すことで、実系統に接続したのと同様の条件を作り出す。詳細は 2002 年 5 月号電気学会誌の特集「電力系統のリアルタイムシミュレーション技術」を参照されたいが、実用に供されているリアルタイム・シミュレータを列挙すると、加 RTDS Technologies 社の RTDS⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、加 TransÉnergie Technologies 社の Hypersim⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、仏の電力会社 EDF の ARENE⁽¹⁸⁾、東京電力の FlexRS⁽¹⁹⁾がある。また、独 Siemens 社はオフライン・プログラムである NETOMAC をリアルタイムで実行できるよう改良した ARTEMAC⁽²⁰⁾を開発している。

3. 瞬時値解析に関する最近の動向

〈3・1〉 定式化 定式化とは解くべき回路方程式を導出する過程 (手順) のことである。表 1 に示した瞬時値解析プログラムのうち、EMTP-RV と FlexRS を除くプログラムは全て古典的な節点解析法⁽⁴⁾により定式化を行っている。従って、理想変圧器や両端を接地しない電圧源の取り扱いが順当にはいかない。一方、電子回路解析の分野では理想変圧器や両端非接地電圧源を簡単に取り扱える修正節点解析法⁽²¹⁾が開発され、電子回路解析プログラム SPICE に採用された。EMTP-RV では理想変圧器や両端非接地電圧源に加えて理想スイッチも容易に取り扱えるようにした拡大修正節点解析法⁽⁶⁾⁽²²⁾を採用している。これにより上記理想変圧器等の回路要素の関係式を回路方程式中に直接取り込むことができ、これら回路要素を順当に、そして、近似なしで取り扱うことができる。ただし、理想スイッチを回路方程式中に取り込むアイデアは「スイッチの混合表現」と呼ばれ我が国では古くから知られている⁽²³⁾。FlexRS では、数値安定性が向上するよう改良した前進オイラー法を積分手法として用いることで、回路方程式自身を解く必要が無く、逐次代入によって瞬時値計算を行うことができる。前進オイラー法の数値安定性確保のため高周波領域での精度が犠牲となっているが、計算量を格段に少なくできるため注目される。

〈3・2〉 解法 ATP, DCG EMTP V1~3, MicroTran は 1960 年代後半に開発されたコードを元に行っているため、回路方程式の解法も基本的には当時のままである。特に非線形要素の取り扱いに問題があり、補償の定理に基づいた解法⁽²⁴⁾を採用しているため、一つの部分回路 (分布定数線路モデルで切り離された回路) 中に一つの非線形要素しか存在できないという制約がある。電力系統には、避雷器 (非線形抵抗)、変圧器や計器の鉄心 (非線形イン

ダクタンス) 等多くの非線形要素が含まれ、また、瞬時値解析においては発電機も回路側から見れば非線形回路要素として取り扱う必要があるため、上記の制約は非常に大きい。これに対処するため、ATP と DCG EMTP V1~3 には酸化亜鉛アレスタのモデルに限り一つの部分回路に複数の非線形抵抗を許す Newton-Raphson 法ルーチンが用意されている。また、一つ前の計算時間ステップにおける電圧・電流値により近似的に非線形特性上の動作点を決定する疑似非線形要素 (pseudo nonlinear elements) も用意されており、これであれば一つの部分回路中に複数接続することが可能であるが、精度および数値安定性に大きな問題がある。EMTDC/PSCAD で採用されている解法は ATP および DCG EMTP V1~3 に近いものであるが、後述する線形補間法により折れ線近似された非線形特性の屈曲点を通過する時刻を正確に算出するため、これにより改善された解が得られる。

一方、EMTP-RV では回路方程式自体を非線形とみなし、各計算時間ステップにおいて解が収束するまで Newton-Raphson 法による反復計算を行う⁽⁶⁾。従って、各計算時間ステップにおいて正しい解が得られる。Newton-Raphson 法の導入に伴い、存在が無意味となった疑似非線形要素は EMTP-RV から取り除かれている。NETOMAC については解法について詳しく説明した文献が無いため不明である(独語の文献は存在するようである)。

リアルタイム・シミュレータについては、各計算時間ステップを実時間と同期する必要があるため、各計算時間ステップで収束計算を行うことは非現実的である。従って、非線形要素の取り扱いには非常に限られたものである。

〈3・3〉 台形法による数値振動 基本的には、FlexRS を除く表 1 のプログラム全てにおいてインダクタおよびキャパシタの数値積分に台形法が使われている。台形法は計算式が簡単であるにもかかわらず計算精度と数値安定性に優れることが知られている。しかし、インダクタ電流やキャパシタ電圧が急変した場合、インダクタ電圧やキャパシタ電流に現実には存在しない数値振動が生じてしまう。特に、PE 機器を含む解析ではスイッチング・デバイスにより電流を入り切りするため、この数値振動の問題が生じやすい。

DCG EMTP V3, EMTP-RV, MicroTran はこの問題を CDA (Critical Damping Adjustment) と呼ばれる方法⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾で解決している。精度は劣るが後退オイラー法を用いれば数値振動が生じないことに着目し、CDA ではスイッチング等により電圧・電流が急変した時点のみ積分手法を台形法から後退オイラー法に変更することで数値振動を防止する。なお、台形法により得られるインダクタおよびキャパシタの等価コンダクタンス分が、後退オイラー法で計算時間刻み Δt を半分としたときに得られるものと等しいことに着目し、後退オイラー法を適用する場合に Δt を半分とすることでコンダクタンス行列の再構成と再対角化を防ぎ、計算時間を節約している。

一方、EMTDC/PSCAD では線形補間法⁽²⁷⁾により数値振

動の問題を回避している。この方法では、ある計算時間ステップから次の計算時間ステップに移るときに電圧・電流が急変した場合、線形補間を用いて電圧・電流が急変した時刻を正確に求める。この後の手順は若干煩雑であるから要点だけを述べると、先に求めた時刻から台形法と計算時間ステップの半分の幅の線形補間を併用して数値振動を除去し、最後に再び線形補間を用いて元の計算時間刻みに戻る。なお、線形補間法の分かり易い説明が電気学会技術報告第 761 号「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」にある。

Hypersim においても線形補間法の一種⁽²⁸⁾が用いられている。NETOMAC では、 Δt を半分とした後退オイラー法と線形補間を組み合わせた手法⁽¹⁰⁾⁽²⁹⁾が用いられているようである。上記以外のプログラムでは数値振動の除去は行われていないようである。

〈3・4〉 スイッチ条件の収束 回路中のあるスイッチが動作すると、その結果として瞬時に別のスイッチが動作する場合がある。パワーエレクトロニクス回路における転流がこれにあたる。EMTDC/PSCAD と EMTP-RV では、各計算時間ステップにおいて全てのスイッチの状態が変化しなくなるまで計算を繰り返してから次の計算時間ステップに移る。これと比べると自動化されてはいないが、ATP ではユーザが“GIFU SWITCH”と指定したものに対して瞬時転流が可能となる(岐阜大学の村井教授の発案したロジックであるため GIFU の名前が付いた)。上記のような機能が無いプログラムでは、スイッチを含む回路の解析で正しく転流できない場合がある。

〈3・5〉 線路モデル 架空送電線や地中ケーブル(以降、まとめて送電線と呼ぶ)のモデルは、電力系統の瞬時値解析を行う上で欠かせないものの一つである。商用周波成分のみに着目した解析では送電線を π 型等価回路で模擬しても大きな誤差を生じないが、より高い成分の周波数にも着目すれば、分布定数線路としてモデル化する必要性が生じる。また、高い周波数では大地および導体の表皮効果が顕著となり、これに起因する周波数依存性が生じる。特に各種サージ解析や高調波解析ではこの周波数特性の模擬が必要となる。表 1 に挙げた瞬時値解析プログラムのほとんどが、伝搬定数と特性インピーダンスの周波数特性を考慮できるモデル⁽³⁰⁾(FD-LINE もしくは JMARTI モデルと呼ばれる)を有している。さらに、EMTDC/PSCAD および EMTP-RV は伝搬定数と特性インピーダンスに加えてモード変換行列の周波数特性も考慮できるモデル⁽³¹⁾を有しており、また、ATP も筆者が開発した同様のモデル⁽³²⁾を有している。これらのモデルは相領域で計算を行うため相領域モデルと呼ばれる。

〈3・6〉 GUI 表 1 に示した瞬時値解析プログラムの全てが GUI (Graphical User Interface) を有しており、画面上に回路図を描くことで入力データを作成できる。テキスト形式のデータを用意していた頃と比べて大きく効率化が図られた。

4. おわりに

第3章では、非線形リアクトルのモデルや発電機のモデルについても触れたかったが紙面の都合で割愛した。また、筆者は、学生時代に ATP の開発に、電力中央研究所にて EMTP-RV の開発に携わったため、多少情報がこれらのプログラムに偏った感はあるが、本稿が瞬時値解析技術の発展の一助となれば幸いである。

(平成18年7月26日受付)

文 献

- (1) T. Noda and K. Temma: "Techniques for the electromagnetic transient simulation of a power system including power electronics controllers", *IEEE J. Journal*, Vol.126, No.6, pp.360-363 (2006-6) (in Japanese)
- 野田 琢・天満耕司:「パワーエレクトロニクス応用機器を含む電力系統の瞬時値シミュレーション技術」, 電学誌, **126**, 6, pp.360-363 (2006-6)
- (2) T.-K. Kim, Y.-B. Yoon, J.-B. Choo, R. Kuffel, and R. Wierckx: "Development and testing of a large scale digital power system simulator at KEPCO", Proc. IPST 2001 (Int. conf. Power Syst. Transients), pp.704-709, Rio de Janeiro, Brazil (2001)
- (3) "The world's largest power system simulator installed in Korea", RTDS News, June 2001, RTDS Technologies Inc. (available at <http://www.rtds.com/news.htm>)
- (4) H.W. Dommel: "Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-88, No.4, pp.388-399 (1969-4)
- (5) <http://www.microtran.com/>
- (6) J. Mahseredjian, S. Denetiere, L. Dube, B. Kodabakhchuan, and L. Gerin-Lajoie: "On a new approach for the simulation of transients in power systems," Proc. IPST 2005 (Int. conf. Power Syst. Transients), Paper # 05-139, Montreal, Canada (2005)
- (7) <http://www.emtp.com/>
- (8) <http://www.ece.mtu.edu/atp/>
- (9) <http://pscad.com/>
- (10) B. Kulicke, E. Lerch, O. Ruhle, and W. Winter: "NETOMAC—Calculating, analyzing and optimizing the dynamic of electrical systems in time and frequency domain", Proc. IPST'99 (Int. conf. Power Syst. Transients), pp.1-6, Budapest, Hungary (1999)
- (11) <http://www.netomac.com/>
- (12) <http://www.digsilent.de/>
- (13) S.N. Talukdar: "METAP—A modular and expandable program for simulating power system transients", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-95, No.6, pp.1882-1891 (1976-11/12)
- (14) P.G. McLaren, R. Kuffel, R. Wierckx, J. Giesbrecht, and L. Arendt: "A real time digital simulator for testing relays", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.7, No.1, pp.207-213 (1992-1)
- (15) <http://www.rtds.com/>
- (16) V.-Q. Do, J.-C. Soumagne, G. Sybille, G. Cloutier, and S. Poulin: "HYPERSIM—An integrated real-time simulator for power networks and control systems", ICDS 99 (Int. Conf. Digital Power Syst. Sim.), Vasteras, Sweden (1999)
- (17) <http://www.transenergie-tech.com/en/produits/hypersim.html>
- (18) <http://rdsoft.edf.fr/>
- (19) Y. Tada and H. Okamoto: "Feasibility study on development of a low cost and flexible power system real-time simulator", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.2, pp.170-179 (2000-2) (in Japanese)
- 多田泰之・岡本 浩:「低コストな電力系統リアルタイムシミュレータの実現に関する基礎的検討」, 電学論 B, **120**, 2, pp.170-179 (2000-2)
- (20) E. Lerch, O. Ruhle, W. Winter, B. Kulicke, and H.-D. Pannhorst: "Real-time simulator ARTEMAC for enhanced automated interactive testing of digital relays", Proc. IPST'99 (Int. conf. Power Syst. Transients), pp.665-670, Budapest, Hungary (1999)
- (21) C.-W. Ho, A.E. Ruehli, and P.A. Brennan: "The modified nodal approach to network analysis," *IEEE Trans. Circuit & Systems*, Vol.CAS-22, No.6, pp.504-509 (1975-6)
- (22) J. Mahseredjian and F. Alvarado: "Creating an electromagnetic transients program in MATLAB: MatEMTP", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.12, No.1, pp.380-388 (1997-1)
- (23) H. Haneda, T. Maruhashi, and S. Kusumoto: "Digital simulation of thyristor circuits via tableau approach", *T. IEE Japan*, Vol.99-B, No.7, pp.433-440 (1979-7) (in Japanese)
- 羽根田博正・丸橋 徹・楠本 敏:「タブロー法によるサイリスタ回路のデジタルシミュレーション」, 電学論 B, **99**, 7, pp.433-440 (1979-7)
- (24) H.W. Dommel: "Nonlinear and time-varying elements in digital simulation of electromagnetic transients", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-90, pp.2561-2567 (1971-11/12)
- (25) J.R. Marti and J. Lin: "Suppression of numerical oscillations in the EMTP", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.4, No.2, pp.739-747 (1989-5)
- (26) J. Lin and J.R. Marti: "Implementation of the CDA procedure in the EMTP", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.5, No.2, pp.394-402 (1990-5)
- (27) P. Kuffel, K. Kent, and G. Irwin: "The implementation and effectiveness of linear interpolation within digital simulation", Proc. IPST'95 (Int. conf. Power Syst. Transients), pp.499-504, Lisbon, Portugal (1995)
- (28) V.-Q. Do, D. McCallum, P. Giroux, and B. De Kelper: "A backward-forward interpolation technique for a precise modelling of power electronic in HYPERSIM", Proc. IPST 2001 (Int. conf. Power Syst. Transients), pp.337-342, Rio de Janeiro, Brazil (2001)
- (29) P. Lehn, J. Rittiger, and B. Kulicke: "Comparison of the ATP version of the EMTP and the NETOMAC program for simulation of HVDC systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.10, No.4, pp.2048-2053 (1995-10)
- (30) J.R. Marti: "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-101, No.1, pp.147-157 (1982-1)
- (31) A. Morched, B. Gustavsen, and M. Tartibi: "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.14, No.3, pp.1032-1038 (1999-7)
- (32) T. Noda, N. Nagaoka, A. Ametani: "Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.11, No.1, pp.401-411 (1996-1)

野田 琢 (正員) 1969 年生。1997 年 3 月同志社大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程(後期)修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。現在、同所電力技術研究所主任研究員。1995 年米国エネルギー省 BPA コンサルタント。2001 年 1 月～2002 年 3 月カナダ、トロント大学客員研究員。2005 年 4 月より同志社大学大学院客員教授兼任(連携大学院)。電力系統の瞬時値解析手法に関する研究に従事。博士(工学)。IEEE, IEE 会員。