

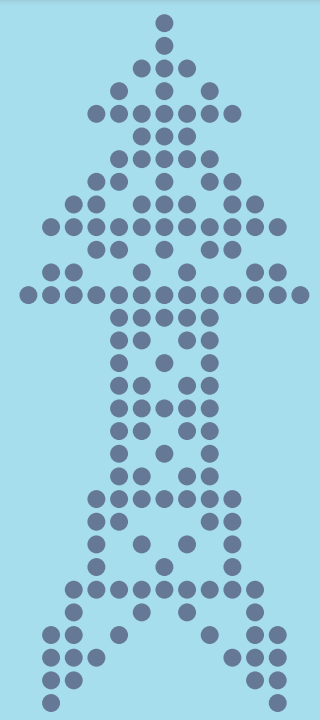
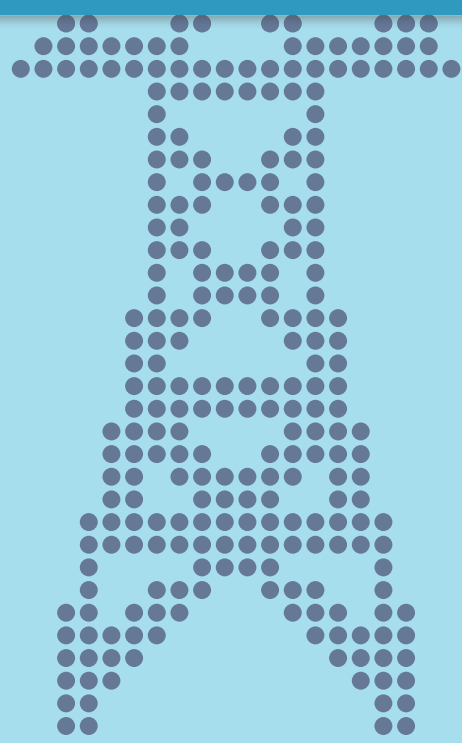
DEN-CHU-KEN

# TOPICS

2012 8 AUGUST

VOL.12

Central Research Institute of Electric Power Industry



## ✓ 進化を続ける電力系統解析プログラムの現在

1. 電力の安定供給を支える電力系統解析プログラム
2. 大規模電力系統の安定度総合解析システム (CPAT)
3. 瞬時値解析のためのプログラム (XTAP)
4. 鉄塔・建物などの三次元構造物のためのサージ現象解析プログラムの開発

## 進化を続ける電力系統解析プログラムの現在

## 1. 電力の安定供給を支える電力系統解析

社会活動の中で日々使われる電力を安定供給するためには、電力系統に生じる様々な現象を解析し、電圧、電流、周波数などを適切に管理していく必要があります。電力系統に生じる現象は多岐にわたるため、これらを一つのプログラムで解析することは不可能で、現象の種類や時間オーダーごとに幾つかのプログラムが開発され、活用されています。

本稿で紹介する電力系統解析プログラムは、送電線への雷撃など電力系統の外部からの突発的外乱、あるいは送電ルートの大規模な変更などに伴う送電設備の開閉時等に、電力系統が過渡的に受ける電氣的影響をシミュレーションする一連の計算機プログラムで、大まかに以下のとおり分類されます。

- ①送電線や変圧器における電圧・電流の定常値を解析
- ②事故発生時の系統全体の電圧・電流の変化を実効値\*レベルで解析
- ③事故発生地点近傍の系統や設備における電圧・電流の変化を瞬時値\*レベルで解析
- ④送電線や配電線への雷撃時に発生する電磁界現象の解析

以下、これらのプログラムの現況についてご紹介します。

\*瞬時値レベルの解析は、電圧・電流の瞬時瞬時の変化をそのまま考慮し、マイクロ秒から数百ミリ秒の比較的短時間の現象を扱う。一方、実効値レベルの解析は電圧・電流の変化の一種の平均値を用いることで、より時間の長い現象を効率的に扱うことができる。

電力中央研究所  
研究アドバイザー  
田中 和幸



様々な形で電力が利用されている都市部の夜景

# プログラム

## 1.1 電力系統解析プログラムの特長

シミュレーションという言葉は、本稿では『計算機による数学的モデルを用いた模擬実験』の意味に用いているが、電力系統解析プログラムの場合、『計算機上に電力系統の特性を表現する数学モデルを構築し、これを用いて突発的外乱等に起因して電力系統が受ける電气的影響の時間推移を模擬的に再現する計算』と言える。電气的影響の極端な事例が停電であり、電力系統のシミュレーションの目的は、各々の電力設備および電力系統全体の安全性・安定性の確認およびその効果に基づいて対策を見出すことにある。

わが国の電力系統におけるシミュレーションの利用は、計算機性能の進歩に合わせ、1970年代に本格化した。当時から、停電を招く危険のある実系統試験は非現実と考えられており、年

ごとに大容量化・広域連系化する電力系統に対し、安定な電力供給に係る種々の仮想条件が比較的容易に反映できるシミュレーションは、電力系統の計画や運用業務に必要な不可欠な技術検討手段であった。

今日、再生可能エネルギーの一層の導入促進あるいは系統連系の更なる拡大等が話題となっている。電力系統解析プログラムが具備すべき解析機能に終りはなく、今後もこうした時代の課題に応えられる研究努力も欠かせない。

本稿で紹介する解析プログラムに類するソフトウェアは国内外に多く存在するが、当所は電気事業の現場に近い立場にあることから、わが国の実設備に対応したモデルの組み込みなど、他機関にない特長を有しており、電気事業での日々の実業務に活用されている(図1-1)。

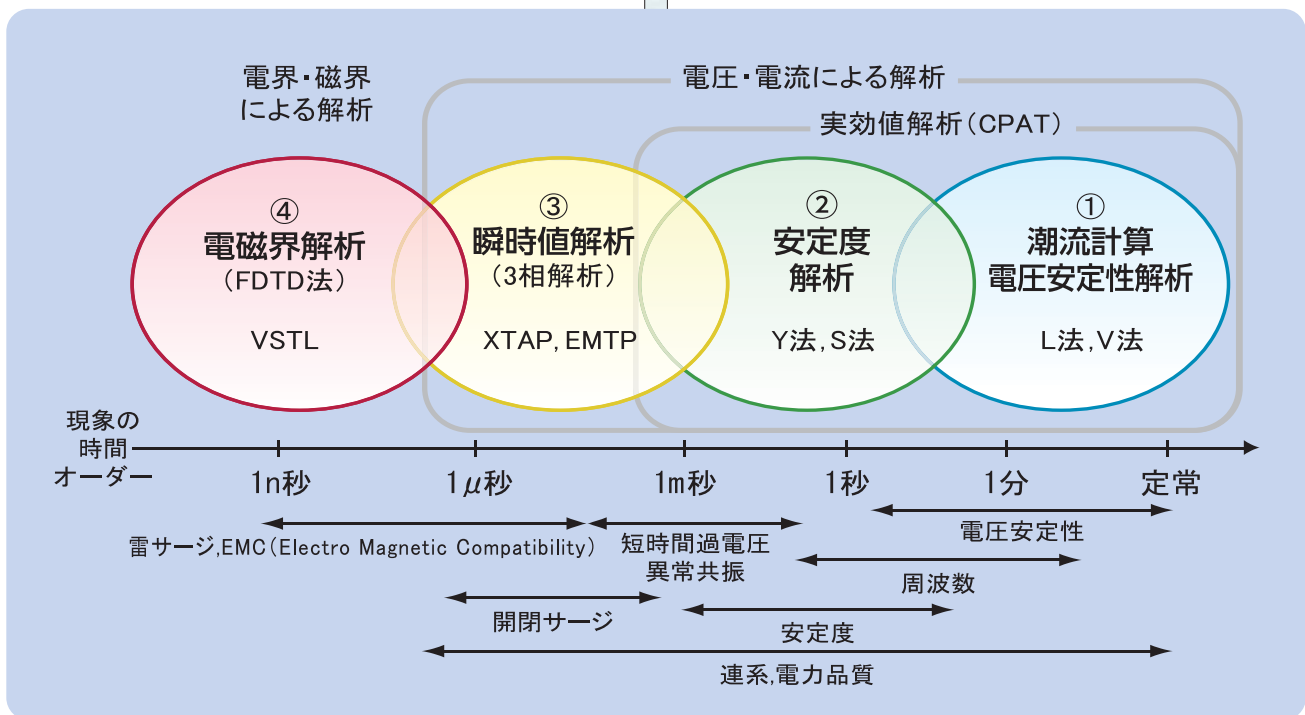


図1-1 電力系統解析プログラムの種類

## 1.2 電力系統の過渡現象とは

地理的に広がる電力系統を池の水面に譬えると、その過渡現象とは、池に石を放り込んだときの水面の変化と言える。送電鉄塔への落雷といった外乱は、池に石を放り込むことに相当する。石が放り込まれた点の水面が大きく上下し、これが波紋となって同心円状に広がっていく。つまり、落雷という外乱が地理的に広がる電力系統に波及していく。このように水面に生じている波紋が過渡現象であり、水面が静穏を取り戻すまでの時間(領域)を過渡領域という。池の水面では広がる波紋はいずれ減衰して必ず消えるが、電力系統の過渡現象は条件によっては発散し、その結果、停電に至る可能性がある。また、外乱により大きな過電圧や過電流が生じる場合には機器が損壊することもありうる。このため、過渡現象の解析は電力系統の解析の中でも重要な位置を占めている。

一口に過渡領域といっても、電力系統ではナノ秒のオーダーから10数秒程度までの広い範囲を示す。そのため、以下に述べるように過渡領域を大きく三つに分け、それぞれの時間領域での現象を適切に解析できるプログラムを開発している。池に石を放り込んだ場合に水面に波紋が生じる現象は、よく見ると、(1)石が放り込まれた直後に水面が最も高くなる瞬間があり、続いて、(2)石が放り込まれた付近に大きな擾乱が生じ、そして、(3)波紋として広がっていくという三つの時間領域に分けて考えることができる。例として送電鉄塔に落雷があった場合を考えると、上記の三つの時間領域は、(1)鉄塔のがいし連に大きな電圧が加わり絶縁破壊が生じる時間領域、(2)絶縁破壊により発電所からの電流が大地に流れ二次的に大きな電圧・電流を生じる時間域、(3)その結果、広域に動揺が生じる時間領域にそれぞれ対応する。

## 1.3 なぜ数値電磁界解析プログラムVSTLが必要か

まず、(1)の時間領域での現象を考えてみる。電気を表す量としては、電圧・電流が一般的である。しかし、実際の現象としては、電界・磁界が変化することで電圧・電流が変化している。送電鉄塔に落雷があった瞬間、雷撃電流により鉄塔周囲に電磁界が発生し、これによりがいし連に大きな電圧が生じる(図1-2)。この時、鉄塔周囲に生じる電磁界の変化はマイクロ秒のオーダーという極めて短い時間で生じる(雷サージ)。そこで、この短時間の電界・磁界変化のシミュレーションによりがいし連に印加される電圧を正確に計算するのが数値電磁界解析手法である。当所では、数値電磁界解析のためのプログラムとしてVSTL (Virtual Surge Test Lab.) を開発し、落雷直後などの急峻な現象の解析に役立てている。

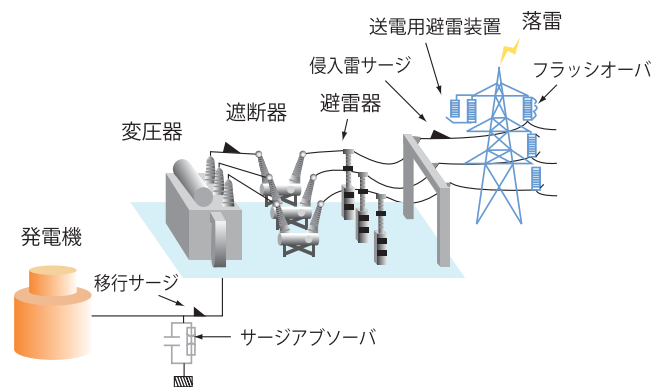


図1-2 発電所への雷サージの侵入

## 1.4 なぜ瞬時値解析プログラムXTAPが必要か

次に(2)の時間領域を考える。マイクロ秒より長い時間領域になると、電磁界の変化と電圧・電流の変化が同時と見なせるようになるため、電圧・電流による

解析で十分な精度が得られる。電圧・電流は、電力系統(正確には交流電力系統)では波のように時々刻々と変化している。50Hzというのは、この波が一秒間に50回生じることを意味している。その一周期は20ミリ秒であり、これに比べてマイクロ秒という時間は、まだまだ短い。したがって、(2)の時間領域では電圧・電流の変化の波を、そのまま評価することが必要となる。これを計算により行うのが瞬時値解析であり、マイクロ秒から数100ミリ秒の時間領域の解析を担当する。従来から瞬時値解析プログラムは、変電所に雷電流が侵入した場合の過電圧の解析、しゃ断器投入時に生じる過電圧や変圧器に突入する過電流の解析、鉄共振など異常共振現象の解析、保護リレーの特性の調整に関連する解析などに活用されてきた。

また、最近では、周波数変換所、直流送電、太陽光発電設備で利用されるパワーエレクトロニクス機器がミリ秒オーダーの短い時間で動作する機能を持つことから、これらの機器の解析にも利用されるようになった。当所では、電力系統瞬時値解析プログラムXTAP (eXpandable Transient Analysis Program) を開発し、これらの解析に活用している。

### 1.5 なぜ実効値解析プログラム(CPAT)が必要か

最後に(3)の時間領域を取り上げる。この時間領域で問題となる広域の動揺は、長ければ2、3秒の周期の変化であり、前項に述べた50Hzの波よりもずっと周期が長い。一秒間に50回の波が全体として、もっと長い周期でうねっているという言い方ができよう。この「うねり」に着目して解析する場合には、50Hzの波を正確に評価する必要は必ずしもない。そのため、この波を一種の平均値(実効値という)で置き換えて計算を行うのが実効値解析

である。こうすることで、瞬時値解析に比べ計算量を大幅に少なくすることができ、より大規模な系統の解析が可能となる。

ここで評価対象となる「うねり」は例えば発電機の発電電力の動揺として現れる。発電機はタービンなどからの機械的エネルギー(回転エネルギー)を電力に変換する機械であり、通常は両者がバランスしている。ところが送電線に落雷による地絡状態が生じると、送電線を流れる電力がゼロとなり、発電機とのエネルギーのバランスが崩れてしまう(図1-3)。地絡は事故点を挟む両端の変電所の遮断器が開くまでのわずかな時間(最短で0.06秒程度)しか継続しないが、ここで生じるアンバランスのため、発電機の動揺が甚だしくなり、安定な運転が困難となると、保護リレー等により停止せざるを得ない。このような現象は数秒~20秒程度継続するが、これをシミュレーションするのが過渡安定度解析である。

過渡安定度を左右する要因は、落雷を受ける送電ルートや電線の数(通常2回線なので最大6本)、雷侵入前に送電線を流れていた電力の大きさなどであるが、安定か不安定かの把握はシミュレーションしなければ分からない。

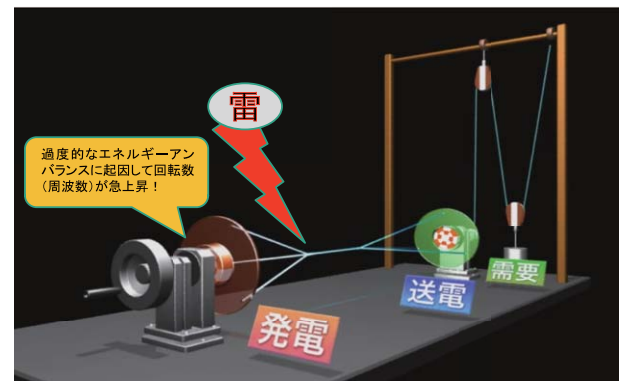


図1-3 過度安定度解析(落雷によるエネルギーバランスの崩壊)の模式図

## 1.6 当研究所解析プログラムの特長

解析プログラムで重要なのは「解析精度」、「使い易さ」、そして「ニーズ対応」である。

解析精度に関しては、解析手段(手法)の他に、解析目的に応じた適切なモデリングが重要である。たとえば送電線モデルの場合、瞬時値解析では見たままの鉄塔形状に近く精緻に模擬するが、実効値解析では単に電線1本(単線結線)で代表して模擬される。一方、たとえば発電機モデルは、実効値解析では発電機の他にタービンやボイラ等も含め比較的詳細に模擬されるが、瞬時値解析では発電機のみ簡単に模擬される。どの程度が最適なモデルかという明確な指標はないが、こうした数値モデルは人間の想定範囲に留まるため、精度の有効性を検証するには実物に近い設備を用いて対比評価するのが効果的である。実物に近い設備の一例が、当所の「電力系統シミュレータ」である。新しい設備の導入やこれまでにない不安定現象が予測される場合などに、現象の

解明、関係する数学モデルの開発に効力を発揮している。

実務的観点からは、プログラムの使い易さも重要である。現場で入手できないデータを多く必要とするプログラムでは、利便性に富むとはいえない。また、入力データの種類が多種多様であり、しかも大規模なモデルでは数万のオーダーと多量に及ぶ。そのため、不適切なデータが含まれる場合に、単に“計算できない”で終わるのではなく、適切にその原因データを検出・提示する機能も重要である。

最後のニーズ対応は、近年でいえばパワーエレクトロニクス機器や太陽光発電モデル等、電気事業で必要とされる解析ニーズに速やかに対応し、適宜プログラムに反映している。

以上の諸点については、当所解析プログラムは過去長年に亘って、電力各社からの数多くの支援・協力を反映しており、今日では他機関にない特長を有している。とくにプログラムニーズ対応に関しては、電気事業の研究機関としての大切な責務のひとつであり、今後とも研究資源の充実を図っていく考えである。

|            |      | S45-54  | S55-H1                        | H2-11                 | H12-21          | H22-   |
|------------|------|---------|-------------------------------|-----------------------|-----------------|--------|
|            |      | 1970年代  | 1980年代                        | 1990年代                | 2000年代          | 2010年代 |
| 数値電磁界計算    | VSTL |         |                               |                       | 2000 旧版 2006 新版 |        |
| 瞬時値計算      | XTAP |         |                               |                       | 2006 旧版 2009 新版 |        |
| 潮流計算       | L法   |         | 1981 初版                       | 1990 電圧安定性解析機能追加      |                 |        |
| 過渡安定度計算    | Y法   | 1975 原版 | 1980 X法                       | 1987 改良Y法 (数年後にY法と改名) |                 |        |
| 定態安定度計算    | S法   |         | 1979 初版 1983 制御系パラメータの最適化機能追加 |                       |                 |        |
| 電圧シミュレーション | V法   |         | 1980 旧版                       | 1997 新版               |                 |        |
| 短絡容量計算     | T法   | 1973 原版 | 1993 初版                       |                       |                 |        |
| 故障計算       | F法   |         |                               | 1995 初版               |                 |        |
| 瞬低影響解析     | K法   |         |                               |                       | 2003 初版         |        |
| 高調波計算      | H法   |         | 1982 旧版                       | 1995 新版               |                 |        |
| 電力系統縮約計算   | Q法   |         | 1981 旧版                       | 1997 新版               |                 |        |

図1-4 電力系統解析プログラムの開発年譜

## コラム

# STATCOM (STATIC synchronous COMPensator)

—半導体電力変換装置を用いた無効電力の補償装置—

太陽光発電(PV)が大量に導入されてくると、その出力が需要を上回って、配電系統を逆流する逆潮流という現象が発生します(図1)。この逆潮流により、配電系統の末端において電圧が上昇し、適正電圧範囲を逸脱するという問題が生じます。これに対し、無効電力を出し入れすることで電圧を変えることができます。STATCOM (STATIC synchronous COMPensator)は、半導体電力変換装置を用いて無効電力を調整することで、配電系統電圧を適正範囲内に維持する働きを持ちます。

配電系統の電圧調整には、配電線の負荷状態に応じて配電用変圧器の送り出し電圧を調整する装置(LDC: Line Drop Compensator)や線路途中で電圧を調整する装置(SVR: Step Voltage Regulator)が用いられています。これらは機械的に電圧を調整するタップ制御機器であり、応答時間が数分以上であり、タップ寿命を考慮して動作回数を抑える必要があるため、PVの出力変動による電圧変動を十分に抑制することは困難です。

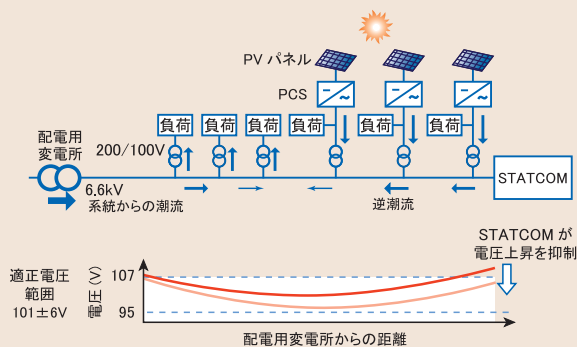


図1 STATCOMによる配電系統電圧の制御

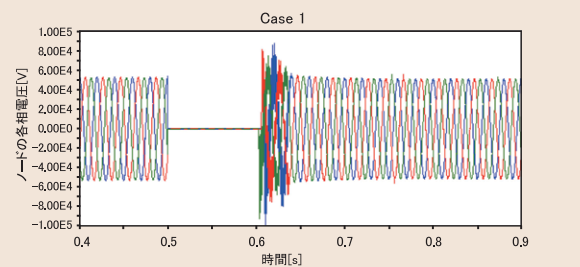


図2 XTAPを用いたSTATCOMの電圧制御特性(解析例)

STATCOMは、半導体電力変換装置の特徴を活かして、数分以下の短時間変動成分を連続的に補償できることから、上記のLDCやSVRと組み合わせることで、合理的な電圧変動抑制対策が可能となります。さらに、PV用パワーコンディショナーの定力率運転等の電圧変動対策を加えれば、対策コストの一層の削減につながります。

STATCOMのこうした利点を定量評価するためには、XTAPに代表される瞬時値解析の利用が欠かせません。図2は、配電系統事故(0.5~0.6秒間)後のSTATCOMによる系統電圧回復制御機能の解析例です。

図3に既開発のSTATCOMの外観写真を示しますが、大きく重いため配電柱に設置することができず、設置場所の面で難点があります。現状のSTATCOMでは変圧器が相当の体積、重量を占めていますが、回路構成を工夫すれば変圧器を用いないSTATCOMを実現することが可能であり、大幅に体積、重量を削減できます。当所では、(株)東芝との共同研究において、変圧器レス化により、柱上設置を可能にするSTATCOM(図4)の開発にチャレンジしています。



図3 既開発STATCOM(据置型)



図4 柱上設置STATCOMのイメージ図

## 進化を続ける電力系統解析プログラムの現在

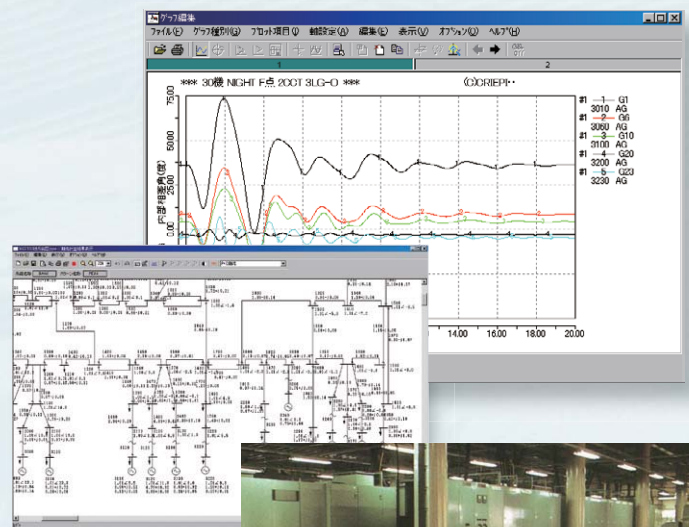
## 2.大規模電力系統の安定度総合解析

わが国の電力系統は長い期間を経て小規模系統から大規模系統へと発展し、この規模の拡大に伴って、より高い電圧階級の導入、広域連系化が進められてきました。一方、電力系統で輸送できる電力の大きさは、①設備の熱容量、②周波数、③電圧(電圧安定性)、④安定度のそれぞれによって制約を受け、すべての制約を満たさなければ安定な送電ができません。そのため、広域・大規模な電力系統のモデルを用いて、4つの制約がいずれも満たされているかどうかを総合的に評価できる解析プログラムが必要となります。

電力中央研究所では、このようなニーズに応えるため、1970年代から系統解析プログラムの開発に取り組み、1980年に様々な解析プログラムにより総合的に系統解析を実施できる「電力系統安定度総合解析システム(CRIEPI's Power System Analysis Tool、CPAT)」を実用化しました。その後も、電力設備や系統制御手法の高度化・複雑化など、時代のニーズに対応してCPATの改良を進め、現在に至っています。CPATは国内の全ての電力会社で用いられており、わが国の電力の安定供給を支えるツールの一つとなっています。

本章ではCPATの概要をご紹介します。

システム技術研究所  
上席研究員  
永田 真幸



総合的に系統解析を実施するCPAT



# システム (CPAT)

## 2.1 CPATを構成する系統解析プログラム

わが国の電力系統は北海道から九州までが電氣的につながり、一つの大きな連系系統を構成している。この系統内には膨大な数の発電機、送電線、変圧器などの電力設備があり、電力系統を通じて安定して電力を送電するためには熱容量、周波数、電圧、安定度の制約を満たすことが必要である。そのため、多数の電力設備の特性を適切に考慮しつつ、種々の解析計算を効率良く高い精度で実施できることが求められる。CPATはこのようなニーズに応える系統解析システムであり、図2-1に示す種々のプログラムから成る。以下、CPATの主要なプログラムがどのような解析を行えるのか、その概要を紹介する。

### (1) L法、V法(潮流計算、電圧安定性解析)

潮流計算は電力系統内の各設備に電力(潮流)がどのくらい流れるのか、その結果、各地点の電圧がどのような値となるかを評価する計算であり、熱容量、電圧の面から必要となる。CPATにおいてはL法が対応し、ある一時点での潮流状態を求めることができる。

実際の電力系統においては、電力需要が時々刻々と変化し、潮流や電圧もこれに伴って変化するため、系統各部の電圧を適切に調整する必要がある。しかしながら、電力系統には送電する電力が大きくなると、その電力を受電する地点の電圧が下がる特性があり、急激に需要が増加した場合等に、電圧の調整がこれに対応しきれないと電圧が異常に低下し(電圧不安定現象)、最悪の場合、停電に至ることがある。この現象の解析には、潮流計算と共に時間変化をシミュレーション計算により評価する方法が用いられる。CPATではL法と共にV法が対応する。

### (2) Y法、S法(安定度解析)

上に述べたL法、V法は発電電力の動揺などが生じていない、定常状態の電力系統の解析を行うプログラムである。これに対し、送電線の雷事故(系統事故)など、電力系統に外乱が加わった場合に、電力系統が過渡的に不安定とにならないかどうかを評価する計算(過渡安定度解析計算)を行うプログラムがY法である(図2-2)。

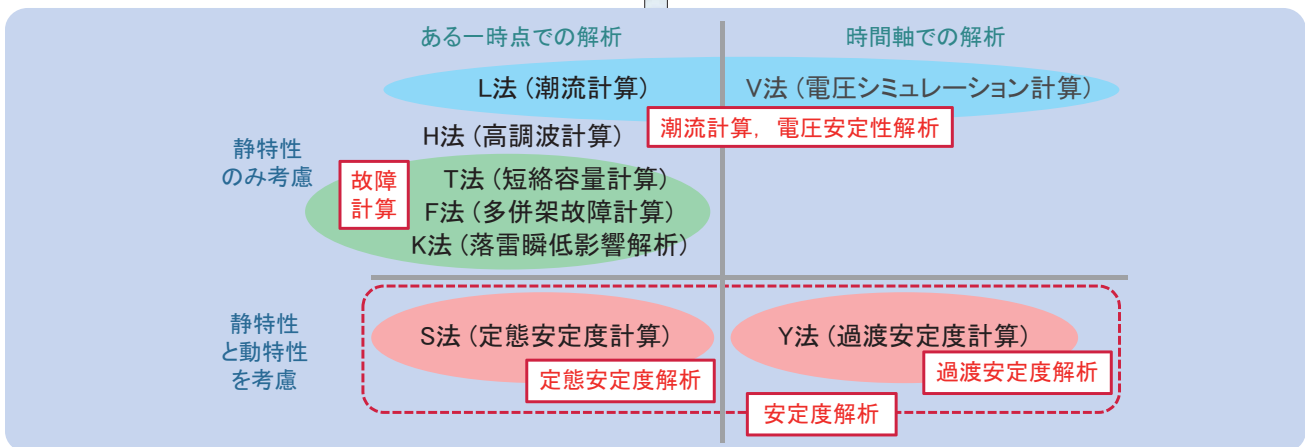
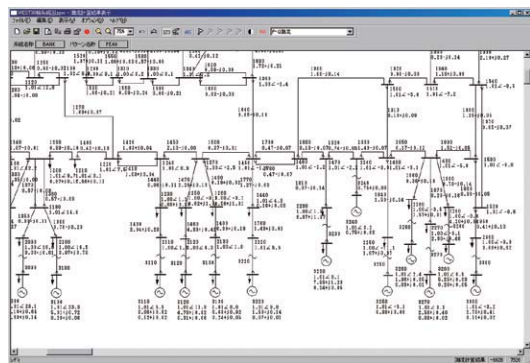
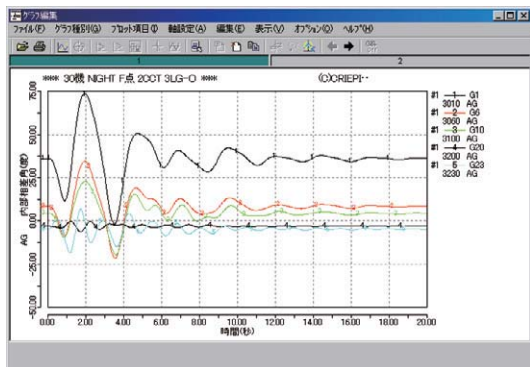


図2-1 CPATを構成するプログラム

過渡安定度の計算においては、外乱発生時に発電機やその制御系などがどのように応動するかを考慮する必要がある。Y法では、これらの特性（動特性）が非線形微分方程式でモデル化され、数値積分手法（4次のルンゲクッタ法）を用いて発電電力などの時間的推移を評価している。これにより系統事故時に電力系統の安定性が維持できるかどうかを把握できる。さらに、Y法では、発電機のモデルの他に、例えば火力発電機でのタービン、ボイラ等の特性のモデルも考慮することができる。このため、大容量の発電ユニットの脱落などが起きた場合等に周波数を適正に維持可能か評価することもできる。



(a)モデル系統



(b)系統事故時の発電機の動揺波形の例

図2-2 Y法による過渡安定度解析の例

S法は動特性のモデルを考慮する点でY法と共通するが、過渡的な現象により生じた動揺がどれだけ速やかに収束するかに評価の力点を置いているプログラムである。この動揺の収束の速さを定量的に表す指標が固有値であり、定常状態からの微小変化をモデル化した線形微分方程式から得られる（定常安定度解析計算）。S法は固有値を求めるだけでなく、これを活用して、動揺を速やかに収めるための、制御系のパラメータをどのような値に設計すればよいかを計算することもできる。

## 2.2 CPATの特長と今後の取り組み

1章で述べたように解析プログラムで重要なのは「解析精度」、「使い易さ」、「ニーズ対応」である。

解析精度の観点からは、設備の特性を正確に表現できるモデルが重要である。CPATに具備されている各種モデルは、電気事業の実務での利用からのフィードバックや、当所の電力系統シミュレータによる実機と同等の特性を考慮した検討を通じて、特にわが国の電力系統の実態を反映したものとなっており、精度の高い解析計算ができる。発電機等の主要な要素については、わが国での標準的なモデル、定数があらかじめプログラムに組み込まれており、解析に必要なデータを容易に作成できるようにしている点も特長である。一方、発電機制御系やパワーエレクトロニクス機器は、実設備の構成、特性が様々であるが、Y法、S法ではユーザーが制御系のブロック要素を組み合わせる任意に独自のモデルを構築できるようになっており（図2-3）、モデルの柔軟性に優れている。

さらに、使い易さも重視し、早くからCPATの各種解析プログラムでのデータの共通化を意識して開発を進めており、いったんシステムデータを作成すれば、多くの解析計算がそのデータを共有して実施できる(図2-4)。近年ではGUI(Graphical User Interface)も充実させ、様々な解析計算を容易に効率よく実施できる(図2-5)。

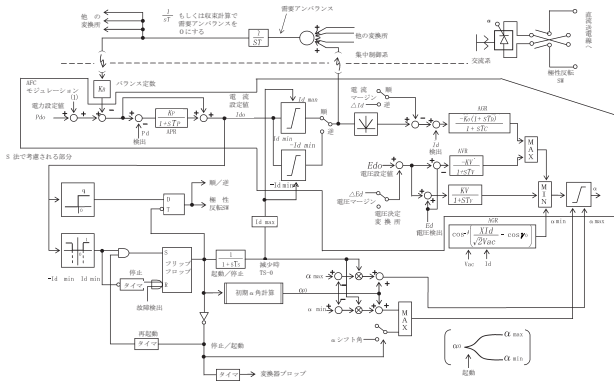


図2-3 制御系モデルの例

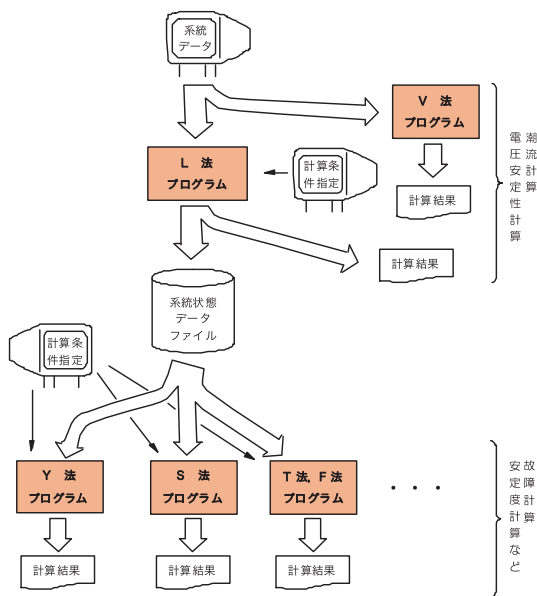
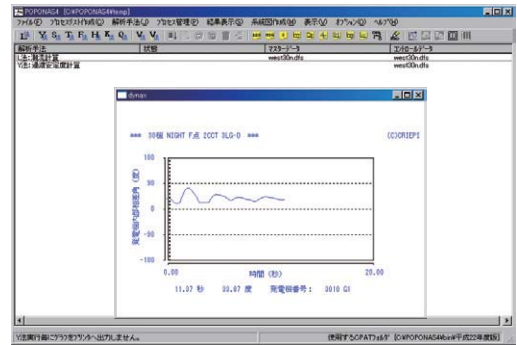


図2-4 CPATでの解析計算の流れ



(実行管理画面および計算中の波形出力画面)  
図2-5 CPATのGUI(POPONAS\*)



(左:66kV 模擬送電線, 右:太陽光発電用PCS)  
図2-6 太陽光発電大量導入時の系統事故時の現象を検証するためのシュミレーター設備

ニーズ対応の点では、これまでも電圧不安定現象による大規模停電の発生を受けた電圧安定性解析機能の充実、直流送電の導入に対応したモデルの開発、解析可能な系統規模の拡大(発電機数が最大1000までの大規模システムを解析可能)など、時代のニーズに対応してプログラムを拡充してきた。現在も再生可能エネルギー電源、特に太陽光発電の大量導入条件下での安定度解析を行うためのモデル開発を、当所の電力システムシミュレータを活用して進めている(図2-6)。今後も研究資源の充実に努め、ニーズに的確に対応するプログラムの開発、高度化を進めていく。

\*POPONASは、(株)電力計算センターの登録商標です。

## 進化を続ける電力系統解析プログラムの現在

## 3. 瞬時値解析のためのプログラム (XTAP)

電力系統解析には瞬時値解析と呼ばれる分野があります。瞬時値解析とは、電力設備への落雷により生じる過電圧をはじめ、変圧器加圧時の突入電流、鉄共振といった過電圧、過電流、異常共振などの解析を行うものです。また、保護リレーの動作解析にも活用されてきました。

最近では、電力融通のための直流送電・周波数変換設備、系統安定化のためのFACTS機器、太陽光発電設備のパワーコンディショナといったパワーエレクトロニクス回路の動特性解明にも欠かせなくなるなど、瞬時値解析の重要性は高まる一方です。そこで当所では、国内の瞬時値解析ニーズにきめ細かく応えるため、電力系統瞬時値解析プログラムXTAPの開発を進めています。

電力系統解析の他の分野では、三相回路である系統を单相回路に簡略化し、系統各部に生じる電圧・電流の実効値について計算を行うのが普通です。一方、瞬時値解析では、系統をそのまま三相回路で模擬し、電圧・電流の瞬時値、つまり波形レベルで計算を行います。すなわち、瞬時値解析では系統を詳細に模擬し、商用周波の一周期より短時間の現象も解析の対象とします。

電力技術研究所  
上席研究員  
野田 琢



拡大するXTAPの解析対象

### 3.1 XTAPとは

従来、瞬時値解析には米国で開発されたEMTP (Electro-Magnetic Transients Program) というプログラムが主に使用されてきた。しかしながら、国内の解析ニーズに合わせて柔軟に改良できない、国内でよく使用される電力機器のモデルを必ずしも搭載していない、日本語による解説書類が少ないなどといった課題があった。そこで当所は、2006年に国産の瞬時値解析プログラムXTAP(eXpandable Transient Analysis Program)の開発に着手し、2009年にはバージョン1を公開した。以降、電力会社を中心にユーザ数を伸ばし、現在では500を超えるユーザが活用するに至っている。図3-1はXTAPの画面例である。以下、XTAPの特長について述べる。

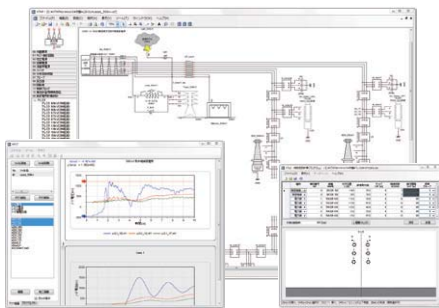


図3-1 XTAPの画面例

#### (1) 装備している電力機器モデル

電力系統は、発電機、送電線、変電機器など各種の電力機器により構成される。このため、XTAPには、基本的な回路部品だけでなく、電力系統の模擬に必要となる各種電力機器の解析モデルも標準で搭載している。ユーザは、これらのモデルを画面上で接続するだけで、簡単に解析したい系統モデルを構築できる。

以下、個別に説明する。回転機としては、同期発電機および誘導電動機のモデルが用意されている。送電線・地中ケーブルには、 $\pi$ 型等価回路モデル、一定パラ

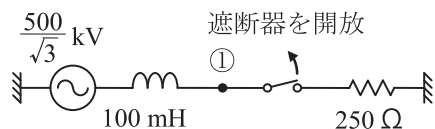
メータ分布定数モデル、周波数依存分布定数モデルが用意されている。変圧器には、2巻、3巻の各種結線のモデルが用意されている。また、制御系の模擬のため、Y法と互換性のある各種制御ブロックを有している。次期バージョン以降のXTAPでは、国内でニーズの高いモデルの拡充を目指している。現在、表3-1に示すモデルの整備を進めており、ユーザがこれらのモデルにパラメータを設定するだけで利用できる解析環境を提供する予定である。

表3-1 整備を進めているモデル

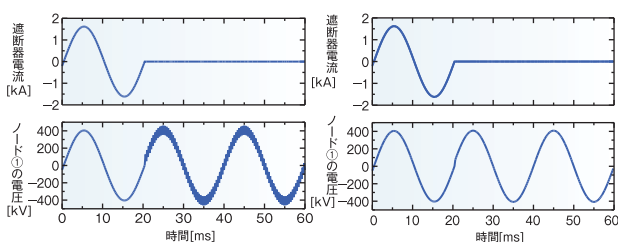
- |   |
|---|
| ・ 発電所雷サージ解析のための要素モデル<br>(送電鉄塔モデル, フラッシュオーバーモデル, 避雷器モデルなど)         |
| ・ 配電線雷サージ解析のための要素モデル<br>(コンクリート柱モデル, 柱上変圧器モデルなど)                  |
| ・ 直流送電設備・周波数変換設備の動特性解析のための他励式および自励式交直変換器のモデル                      |
| ・ 無効電力補償装置 STATCOM のモデル   |
| ・ 軸ねじれおよび飽和の模擬が可能な同期発電機のモデル                                       |
| ・ スマートグリッド関連の瞬時値解析のための要素モデル<br>(太陽光パネル, パワーコンディショナ, 配電線, 柱上変圧器など) |

#### (2) 不要な数値振動の除去

電気回路の瞬時値解析を行うには、微分方程式として与えられる回路方程式を解かなければならない。数値的に微分方程式を解くには数値積分を行う必要があり、EMTPなど従来のプログラムではこの数値積分に台形法と呼ばれる公式が用いられてきた。台形法は精度が高いことで知られている。しかしながら、インダクタ(コイル)の電流が急変した場合などには、実際の回路現象としては生じない架空の振動(数値振動)が計算結果に混入してしまい、計算精度を悪化させる問題がある。当所ではこの問題を解決するための検討を行い、2段対角型陰的ルンゲクッタ法(2S-DIRK法)と呼ばれる公式を採用すれば、台形法と同程度の精度を実現すると同時に、インダクタ電流が急変するような場合にも数値振動が



(a) 計算回路



(b) 台形法による計算結果 (c) 2S-DIRK法による計算結果

図3-2 インダクタ電流遮断時の過度現象計算

混入しないことを見出した。XTAPでは、この検討結果に基づき、2S-DIRK法を採用している。図3-2(a)の回路の瞬時値計算を、台形法と2S-DIRK法により行った結果を図3-2(b)、(c)に示す。ノード①の電圧波形において、台形法では実際の回路現象としては生じない数値振動が混入しているが、2S-DIRK法では数値振動が混入せず、正しい解析結果を得ることができる。

### (3) 安定な解析

瞬時値解析を行う場合、解析精度だけでなく、解析を安定に行えるかどうか大きな問題となる。回路方程式を解くには、先に述べた数値積分に加えて、連立の非線形方程式の解を求める必要がある。これには、反復計算により計算値を徐々に解に収束させていく、いわゆる収束計算手法が用いられる。ただし、用いる収束計算手法が適当でないと、計算値が解に収束せず、解析不能になる場合がある。すなわち、解析を安定に行うことができない。また、解に収束する場合でも反復回数が多いと解析に多大な時間を要してしまう。そこで当所は、比較的少

ない反復回数で必ず解に収束する収束計算手法を開発し、XTAPに実装した。実際に、太陽光発電用パワーコンディショナ回路の解析において、従来の収束計算手法では、ある解析時刻において計算が解に収束せず瞬時値解析の継続が不能となったが、XTAPの収束計算手法を用いることで、正しく解に収束し瞬時値解析を継続できた例もある。

### (4) 定常初期化機能

瞬時値解析の多くは、50/60Hzの定常運転状態に生じる事故などの解析を目的とする。このような事故を解析するには、シミュレーション中でも事故に先立って定常運転状態を確立しておく必要がある。解析を長時間継続していけば、最終的には定常運転状態を確立することができるが、この方法では多大な解析時間を要する。そこで、XTAPでは、条件を設定すれば自動的に定常運転状態から瞬時値解析を開始する機能を有しており、大幅な解析時間の短縮を可能にしている。

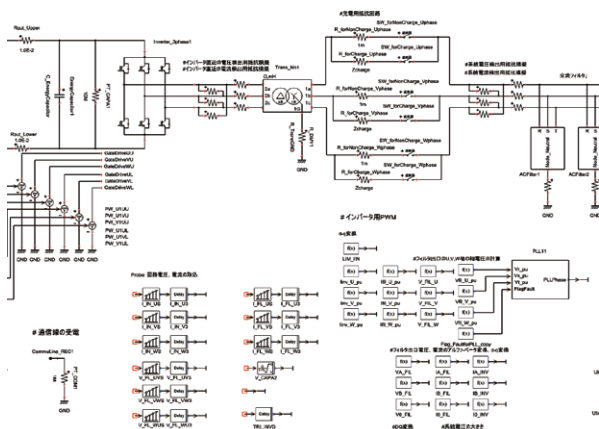
### (5) 使いやすいユーザインターフェース

XTAPは、コンピュータ画面上に回路図や制御ブロック図を描くことによりデータ入力を行える日本語のユーザインターフェースを有している(図3-1)。これにより、視覚的で効率的なデータ入力が可能となっている。

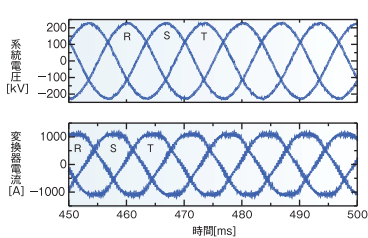
## 3.2 解析事例

これまでにXTAPは、電力会社を中心に、直流送電設備・周波数変換設備の動特性解析、発電所・配電線の雷サージ解析、送電線・地中ケーブルの開閉サージ解析、変圧器の励磁突入電流解析、送配電系統の異常共振解析、太陽光発電用パワーコンディ

シヨナの動特性解析、保護リレーに関する解析などに活用され、設備の運用や形成に役立てられてきた。また、当所では、次世代のスイッチング素子であるSiC素子を用いたインバータやSTATCOMの動特性解析、自励式直流送電設備の動特性解析、超電導限流器のループ配電系統への適用に関する解析などにも活用してきた。以下、2つの事例を紹介する。



(a) モデル(一部抜粋)



(b) 解析例(定常運転状態の波形)

図3-3 直流送電用自励式変換器のモデルと解析例

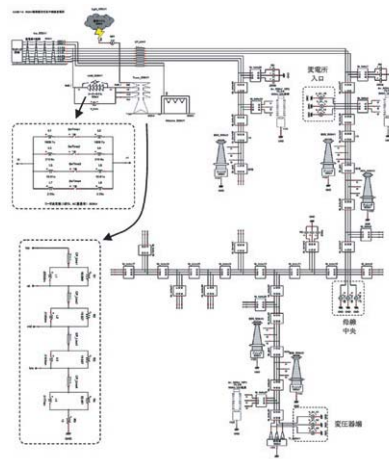
### (1) 自励式直流送電設備の動特性解析

東日本大震災以降、電力融通とそれに用いられる周波数変換所や直流送電設備への社会的関心が高まっているが、XTAPは、これらの半導体スイッチング素子を用いた電力設備の特性解析にも適している。次期バージョンに搭載予定の直流送電用自励式変換器モデルを図3-3(a)に示す。このモデルは、

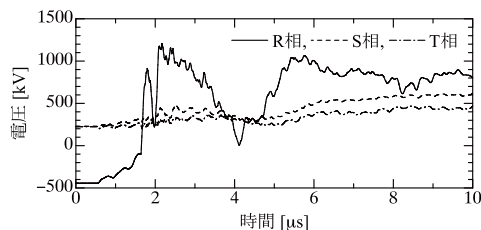
標準的な直流送電用自励式変換器の変換回路と制御系を含んでおり、制御定数を変更するなどして種々の検討を行うことができる。本モデルを用いて運転状態の波形を計算した例を図3-3(b)に示す。

### (2) 変電所雷サージ解析

XTAPは、「発変電所および地中送電線の耐雷設計ガイド」(当所総合報告T40)で推奨されている雷サージ解析の要素モデル全てを標準で搭載しており、これらのモデルをGUI上に配置、接続することで簡単に雷サージ解析を行うことが可能である。500kV気中変電所雷サージ解析の回路をXTAPのGUI上に作成した例を図3-4(a)に、計算結果を図3-4(b)に示す。



(a) 解析回路



(b) XTAPによる変電所入口電圧計算結果

図3-4 500kV気中変電所雷サージ解析

## 進化を続ける電力系統解析プログラムの現在

## 4. 鉄塔・建物などの三次元構造物のための

近年の情報化社会の発達によって、現在、電力のみならず鉄道、航空、通信、データセンターなど重要な社会インフラに大量のデジタル機器が導入されています。そして、これらの機器は、システム制御・情報通信ネットワークなど、社会インフラの安定稼働のための重要な責務を担っています。このようなインフラ設備に落雷が発生すると、雷の影響によって機器に過渡的な異常電圧・電流(サージ)が生じて、機器が故障あるいは誤動作に至ることがあります。

適切な耐雷方策を施すためには、電力設備などのインフラ設備に落雷したときにどのような過渡現象が起こるか、つまり、サージの発生様相を把握することが重要となります。これまででは、前章で紹介したXTAPのように、回路解析技術を用い、電力設備などの電気現象を等価な電気回路に置き換えて、サージの発生様相を予測する方法が主に用いられてきました。この方法は計算効率や計算精度も高く非常に有効な計算方法ですが、鉄塔や建物などの三次元構造物の影響を正確に模擬することができません。最近では、このような構造物におけるサージ伝搬を、数値電磁界解析技術を用いることで、構造物の電気現象を直接模擬し、サージの発生様相を精度よく予測する方法が有効とされています。

本章では、電力中央研究所で開発を進めている数値電磁界解析技術に基づくサージ発生様相の予測プログラム VSTL(Virtual Surge Test Lab.)についてご紹介します。

電力技術研究所  
主任研究員  
立松 明芳



雷光(写真提供:音羽電機工業株式会社 雷写真コンテスト)



# サージ現象解析プログラムの開発

## 4.1 数値電磁界解析技術の特徴

落雷時に、三次元構造物(鉄塔や建物など)や接地構造物(接地網など)に進入した雷サージの伝搬様相(サージ現象)は、電気現象を等価な回路で表現する回路解析では厳密に取り扱うことができない。このようなサージ現象の解析には、数値電磁界解析の適用が有効とされており、当所では早くからこの方法に着目し、数値電磁界解析技術に基づく雷サージ解析手法の開発を進めてきた。表4-1に数値電磁界解析と回路解析の比較をまとめる。数値電磁界解析では、構造物の幾何学的配置を直接取り扱い、構造物や空間中の電磁波の伝搬としてサージ現象を表現するため、回路解析で必要となる電気回路モデル(サージ現象を近似)の開発が不要となり、かつ高精度なサージ解析が可能となる。例えば、図4-1に示すように、回路解析を用いた送電鉄塔の雷サージ解析では、サージ現象を取り扱うために実験結果との対比あるいは経験則に基づいて電気回路モデルを開発する必要がある。一方、数値電磁界解析では送電鉄塔の導体構造を直接模擬すれば良い。

これまでに様々な数値電磁界解析手法が提案されているが、当所では複雑な導体構造や、接地構造物の雷サージ現象において重要な大地の電気パラメータ(導電性など)の取り扱いに優れるFDTD(Finite Difference Time Domain)法と呼ばれる計算手法を選択し、サージ解析プログラムVSTL(Virtual Surge Test Lab.)の開発を進めている。VSTLは、現在、国内では電力業界、大学、建設業界などで活用されている。

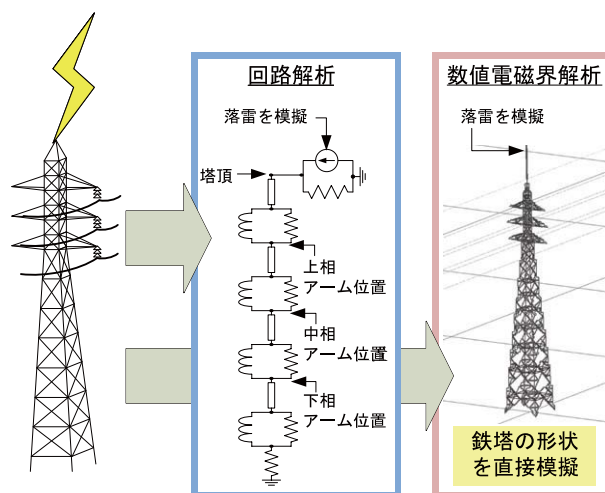


図4-1 雷サージ解析のための鉄塔モデル

表4-1 回路解析と数値電磁界解析の比較

|          | 回路解析                  | 数値電磁界解析                                |
|----------|-----------------------|--|
| 電線       | 大地と平行に配置              | 自由な配置が可能                               |
| 三次元構造物   | 高精度な模擬は不可能            | 構造材間の電氣的結合を考慮して、高精度な模擬が可能              |
| 接地構造物    | 高精度な模擬は不可能            | 接地構造物の過渡特性や接地構造物からの電氣的結合を考慮した高精度な模擬が可能 |
| 落雷時の誘導現象 | 大地に平行な電線に限れば高精度な模擬が可能 | 落雷時の誘導サージ現象の高精度な模擬が可能                  |

## 4.2 VSTLの開発

数値電磁界解析技術は元々アンテナの分野で開発された計算技術であるため、この技術を雷サージ現象の解析に応用するために、(a) 送電線や配電線などの空気中の細長い導体や、(b) 接地網などの大地内の細長い導体、(c) 過電圧対策として一般に用いられる避雷器(機器を保護するために過電圧を抑制する機器)、あるいは(d) 落雷時に

雷によって生じる電磁界を模擬するための雷放電路モデル、などが当所や大学などの研究機関によって開発されてきた。このような解析技術の開発と並行して、当所では数電磁界解析技術に基づくサージ解析プログラム VSTLの開発を進めてきた。

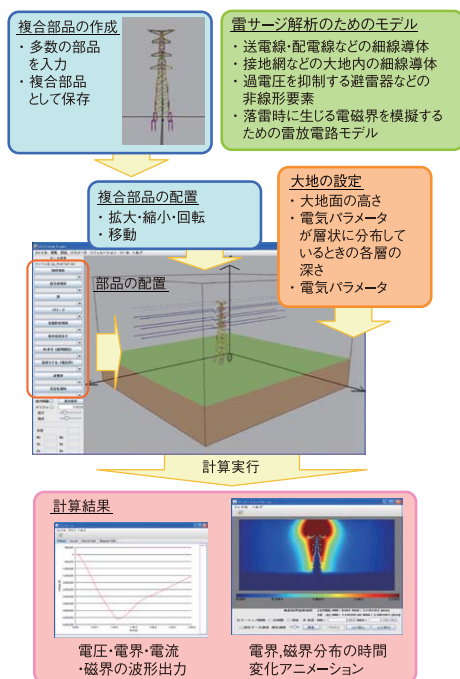


図4-2 VSTLの画面

VSTLは、サージ現象を解析するための計算エンジンだけでなく、図4-2に示すようなGUIを備えており、三次元空間における計算モデルの作成やその形状の確認を容易にしている。サージ解析では、大地面の存在や大地内の電気パラメータの分布が重要となる場合がある。このため、VSTLのGUIでは、平らな大地面や大地内の層状に分布する電気パラメータを非常に簡単に設定でき、山などの起伏や、より複雑な電気パラメータの設定も可能である。さらに、鉄塔や建物など多数の部品(導体など)で構成される複合部品を取り扱うこともできる。また、一度作成した複合部品を三次元空間の任意の位

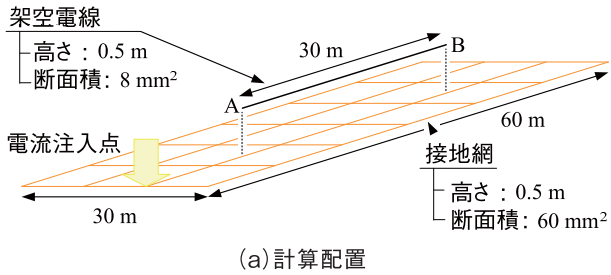
置に、移動・回転などをさせて自由に配置することが可能であることから、多くの建物や接地構造物で構成される発電所など、複雑なモデルを作成する際の作業効率を大幅に向上できる。

### 4.3 VSTLによる計算例

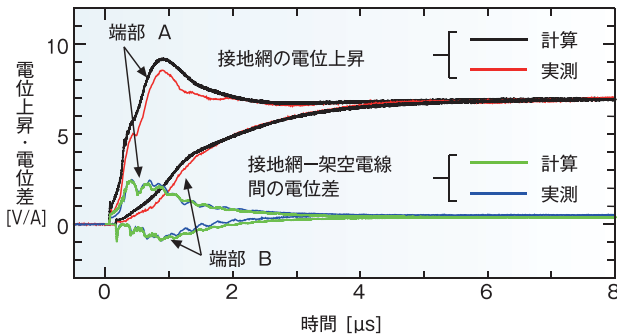
ここでは、VSTLを用いてサージ解析を行った例について紹介する。

#### (1) 接地構造物の雷サージ解析

発電所には、実際に電気が流れる回路の他に、低電圧回路が備え付けられている。この低電圧回路は、事故発生時にその影響範囲が拡大しないように電気の流れを制御するため、非常に重要な役割を担っている。近年、低電圧回路にはデジタル機器が導入されてきており、サージに対する脆弱性が懸念されている。低電圧回路においてこれまでに発生した障害の主要因は雷であり、雷によって低電圧回路にサージが発生する過程として、発電所の地面下に布設された接地網と呼ばれる接地構造物に雷が侵入した際の誘導サージ現象がある。低電圧回路に適切な雷過電圧対策を施すためにはサージ現象の解明とその予測計算プログラムの開発が重要であり、当所ではVSTLに基づく低電圧回路のサージ現象予測計算プログラムの開発を進めている。このために、接地網からの誘導サージ現象の解析にVSTLを適用して、実測結果との対比により、計算結果の妥当性を検証した。図4-3(a)に接地網からの誘導サージ現象の実測に用いた配置を示す。配電用変電所相当の大きさを模擬した接地網にサージ電流を注入して、接地網の過渡電位上昇や接地網—架空電線間の電位差を測定した結果と、VSTLを用いて計算した結果は良好に



(a) 計算配置



(b) 計算結果

図4-3 接地網のサージ解析

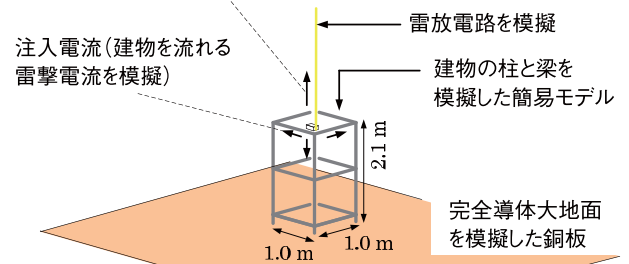
一致した(図4-3(b))。これにより、VSTLを用いて、接地網からの誘導サージ現象を実用的な精度で予測できることを確認した。最近では、計算機の高性能化によりVSTLを用いて、発電所クラスの接地網のサージ解析を行うことも可能となっている。

## (2) 建物の雷サージ解析

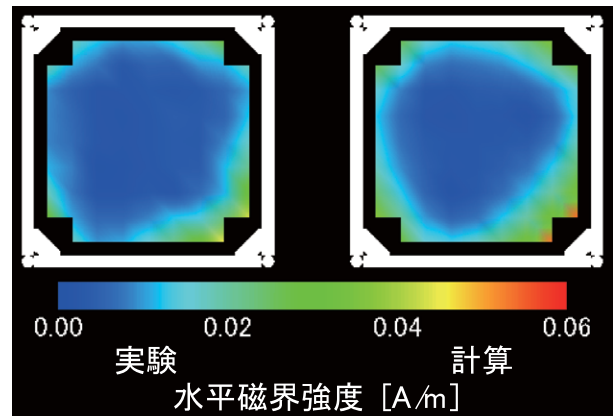
近年では、インテリジェントオフィスビル、工場、一般住居などの建物内において、多数の電子機器類が使用されている。このため、建物が雷撃を受けた場合に発生する過渡電磁界によって電子機器類に誘導電圧が生じ、誤動作や損傷する懸念が指摘されている。電子機器類の適切な雷保護を実現するには、建築物内部における過渡的な電磁界分布の把握が必要となる。このため、VSTLを用いて建物に雷撃が生じた時のサージ現象を計算し、実測結果との対比により、計算結果の妥当性を検証した。

建物の柱や梁のみを考慮した簡易モデルを用いた計算配置を図4-4(a)に示す。建物に雷撃が生じた状況を模擬して、建物上部から電流を注入して、建物内部の磁界分布を実測し、VSTLを用いて計算した結果と比較した(図4-4(b))。計算結果と実測結果は良好に一致しており、VSTLを用いて、三次元構造物となる建物のサージ現象を実用的な精度で予測できることを確認した。最近では、(株)日建設計・東京大学と共同研究を行い、東京スカイツリーに雷撃した時のサージ解析にVSTLを適用した結果も報告している。

注入電流と逆極性の上向き電流  
(帰還雷撃電流を模擬)



(a) 計算配置



(b) 建物内の水平磁界分布(中間フロア)

図4-4 建物内の磁界分布の解析

DEN-CHU-KEN  
**TOPICS**

発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 (大手町ビル7階)

TEL:03-3201-6601 FAX:03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>