電力系統解析システムの開発

上級会員 谷口 治人* 上級会員 田中 和幸*
正 員 内田 直之**

Development of Power System Analysis Tools

Haruhito Taniguchi*, Senior Member, Kazuyuki Tanaka*, Senior Member, Naoyuki Uchida**, Member

The tools for power system analysis should have at least a time-domain simulation program, a steady state analysis program, and data base system for those data. This paper introduces the process of development of these tools, which are being used by the Japanese electric power companies to perform their day-to-day analytical works.

キーワード：電力系統，シミュレーション，解析，定態安定度，データベース

Keywords: power system, simulation, analysis, steady state stability, data base

1. はじめに

電力系統の解析システムは、主に、時間領域で現象をシミュレーションするプログラムと、定態安定度を解析するプログラム、およびこれらのためのデータベースから構成される。本稿では、現在わが国の電力会社で広く使われている Y 法と S 法を中心にその開発過程を簡単に紹介する。

Y 法は、主に安定度や周波数変動（いわゆる動特性）をシミュレーションするプログラムであり、昭和 50 年から電力中央研究所にて開発が始まった。それ以前には、Z 法が用いられていた。Z 法は系統計算に Z 行列を用いており、大規模系統のシミュレーションには記憶容量と計算時間の面から不向きであった。Y 法は後述するように系統計算に Y 行列をそのまま用いる手法であり、これと、アルファベットの Z の前であることから通称として Y 法と称されている。

シミュレーション手法の開発の歴史を図 1⁽¹⁾ に示す。シミュレーションは初期には過渡安定度の解析が主目的であったため、等面積法から示した。昭和 50 年代においても、交流計算盤やアナログシミュレータが使用目的によって使い分けられていたが、Y 法が確立するにつれて、動特性のシミュレーションには Y 法がすべてにわたって使われるようになった。

Y 法は、関根泰次東大教授（当時）を委員長とする、電

図 1 時間領域シミュレーションの歴史

Fig. 1. History of power system dynamics simulation.

気協同研究会の系統安定化専門委員会⁽²⁾のもとで、電力会社やメーカの協力を得て、実際の電力系統での系統試験結果と比較されながら完成していったものである。その後も、制御系やプラントなどのモデリングの拡張や直流系統の追加、系統試験との対比、交・直流電力系統シミュレータでの実験などによって様々な改良がなされていった。なお、昭和 50 年代末には、複雑になりすぎたプログラムを一旦整理してプログラム化しなおし、Z 法、Y 法の次だからということで、X 法と命名したこともあったが、Y 法への愛着が強く、改良 Y 法と呼ばれるようになり、いつのまにか、「改良」もとれて単に Y 法とだけ呼ばれるようになった。

S 法については 3 章に詳しいのでここでは省略する。定態安定度は一般には線形化した取り扱いになるが、現在では、非線形の効果も考慮した同じような解析が大規模系統でも可能となりつつあること⁽³⁾を付言しておく。

2. Y 法（電力系統動特性シミュレーション）の開発

〈2・1〉発電機 電力系統で用いられる発電機は、そ

* (財) 電力中央研究所システム技術研究所
〒201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1
Systems Engineering Research Laboratory, CRIEPI
2-11-1, Iwato-kita, Komae 201-8511

** 東京理科大学 工学部 電気工学科
〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-14-6
Electrical Engineering Dep., Tokyo University of Science
1-14-6, Kudanshita, Ciyoda-ku, Tokyo 102-0073

のほとんどが同期機である。同期機の解析理論は Y 法開発時にはすでに DQ2 軸理論としてほとんど完成されていた。しかし、理論そのままでは送電線などまで微分方程式で表現する必要があり、大規模電力系統を解析・シミュレーションするのは困難であった。このため、故障計算などで一般的に使用されていた対称座標法による複素ベクトル理論を発電機にも適用して系統と接続することが図られた。Z 法では X_d'' ($= X_q''$ と仮定) 背後電圧で系統へ接続し、回転子の動特性が微分方程式で表現された。

しかし、これでは X_d'' と X_q'' が異なる次過渡の凸極性を表現できず、また発電機主磁束の飽和の表現も困難であったため、Y 法においては、電機子漏れリアクタンス背後電圧で系統と接続することとした。しかし、この背後電圧は状態変数にはなりえないため (系統擾乱前後の瞬間でこの電圧は一定とはならない。Z 法の場合は一定値となる)、系統との接続において収束計算を必要とする。この収束計算は、後述する負荷特性において、定インピーダンスではない特性が一般に使用される場合には、負荷特性のためにも必要であることから、計算時間に大きな影響を与えない。

〈2・2〉 制御系とプラント特性 電力系統の動特性に影響を与える発電機の制御系には、励磁制御系、ガバナ (調速制御系)、プラント制御系 (プラント動特性) がある。

励磁制御系の本来の目的は、発電機の過電圧の抑制であり、このためには、速応性が高いほど効果があがるため、一頃は、この目的だけを追求して速応性が高められた時代があった。もちろん、速応性が高まるほど一波の過渡安定度は向上する。しかし、振動発散現象で送電電力が制限されるようになると、適切な速応性が考慮されるようになり、一波の安定度には速応性が高い AVR が、通常運転時には速応性を抑えた AVR を使用する 2 回路形の AVR が提案されたりした。その後、PSS が、振動発散現象の抑制に普及していった。

Y 法開発の初期にはまだ直流励磁機やマグアンプなどが使われていたため、そのモデリングや定数設定には苦労がつきまとった。その後、交流励磁機方式やサイリスタ励磁方式が普及され、また試験法が確立されるにつれ、モデリングと定数設定の精度も向上していった。なお、交流励磁機方式では、交流励磁機のダンパ効果を考慮したモデルも利用されるようになった⁽⁴⁾。

なお、このように様々なタイプの励磁方式が存在するため、ある程度標準的なモデルは、Y 法には内蔵させたが、モデルの拡張性をひろげるため、任意制御系組み込みブロックを初期の段階から用意した。これは、一次遅れや加算などの要素 (ブロック) を用意しておき、これらを任意に組み合わせることにより、モデルを表現するものである。この場合、各ブロックの計算の順序が重要であり、グラフ理論を応用して順序付けを行った。

ガバナについても、発電機遮断後の回転数上昇の抑制を目的に、高速化や、回転数上昇に対してきわめて鋭敏に動作する機構が設けられていった。このため、安定度や系統

分離後の周波数変動に顕著な効果をもたらすので、これらを十分に考慮したモデルを開発し、Y 法に装備していった。ただ、1980 年代頃までは機械油圧式のガバナが主流であったため、励磁系と同じく、モデリングや定数設定には格別の注意が必要であり、発電機の部分負荷遮断や 4/4 負荷遮断試験結果などを参照して個別に設定していった。

系統分離を伴うなど周波数変動が大きい場合には、周波数がある程度落ち着く数分間にわたるシミュレーションが実施される。このような場合には、プラントの動特性が極めて重要となる。また、周波数変動や電圧変動によってプラントがトリップする場合もある。これらを正確に表現するためのプラントとその制御系のシミュレーションモデルを順次開発していった。現在では、原子力発電所 (BWR, PWR)、火力発電所 (石炭、石油、LNG など)、コンバインドサイクルなどのプラントモデルを用意している。原子力などの数が多くないプラントでは、モデリングと定数設定は一品料理的に個別に行っている。また、任意制御系組み込みブロックで表現する場合も多いがその場合にはブロックの数は数百を超える場合が多い。

〈2・3〉 負荷特性 遠方の発電機から途中負荷がほとんどない系統で送電している場合には、負荷特性はさほど重要ではない。このため、Y 法初期では、モデルとしては誘導機や各種負荷特性を備えていたものの、その使用定数などについての情報は十分ではなかった。しかし、わが国の連系系統のように、ある程度地域ごとに負荷と発電がバランスするような連系系統の解析では負荷特性が極めて重要となる。このため、実系統での実測によって、負荷の電圧・周波数特性や、脱落特性が統計的に求められていった⁽⁵⁾。

〈2・4〉 系統計算 系統計算は、今日では縁の下 (基盤) 技術である。この計算は、各々の発電機電圧 (電流源に等価変換) を所与として、そのときの電力ネットワーク各部の電圧や電流を計算することを指す。その計算式の形態は図 2 のようであり、業界で一般に Y 行列と呼ばれている行列が主役である。過渡安定度解析では、この行列に負荷の電圧特性や 3 相地絡など系統故障の模擬などが反映される。

単なる逆行列演算ではないかと問い詰められれば、そのとおりである。ただ求解手順に幾らかの高速化・省力化工夫はあって、一般には Y 行列中の“非ゼロ”要素のみを世

図 2 IEEE118 ノードモデル系統計算式の概要
Fig. 2. Outline of Y matrix of IEEE 118 model.

知辛く 1 列に並べて、その状態で図の電圧ベクトルを計算する（だから直接的な逆行列演算はしない）という、知らない人には手品のように映る技法を用いる。

この技法は 40～50 年ほど以前の先人になるものであり、当時の数学分野から疎行列演算技法を借り受け、電力ネットワークに特化した技法を開発した⁶⁾という歴史がある。こうした業績あって、電力系統規模が大きく拡大した今日でも、数万次元の計算が何ら問題なく日常的に行われている。

3. S 法（固有値解析手法）の開発

〈3・1〉大規模系統の定態安定度 大規模系統の動的定態安定度解析手法のニーズが高まりその開発が初められたのは昭和 50 年前後である。当時、わが国の電力系統は急速な拡大を続けており 50 万 V 送電線の導入が始まったところであった。その頃、わが国は定態安定度に関する 2 つの大きな課題を抱えていた。一つは揚水式水力発電所で発生した短周期の持続振動の問題であり、もう一つは中西連系系統にみられた長周期動揺の弱制動現象の問題であった。前者は 1 機無限大母線系統モデルによって解析が可能であった。一方、後者については、十分な解析手法がなく、その原因と効果的な対策、あるいは運用計画を検討するために、大規模系統を対象として発電機や制御系の詳細モデルを用いた高精度な定態安定度解析ができる解析手法の開発が強く求められていた。過去においてはこのように制御系の効果を考慮する場合を動的定態安定度と言っていたが、最近では単に定態安定度解析と言うことが多く本稿においても後者を用いている。

この項を執筆している筆者が東京大学大学院博士課程を修了して電力中央研究所に入所したのが昭和 53 年であり、この問題にいきなり真正面から取り組むこととなった。

〈3・2〉固有値法による定態安定度解析 昭和 53 年は、前述の電協研の活動が最盛期であり、定態安定度解析手法としては周波数応答法が取り上げられていた。当時としては、大規模系統の唯一の解析手法であったが、計算精度や計算時間、あるいは使い勝手の面で十分なものではなかった。従って、時間領域の解法である Y 法を用いて計算時間にかまわず力づくで定態安定度解析を行うのが普通であった。入所したばかりの著者は、当時、部長であった上之蘭博氏に呼ばれて、「どんな方法でも良いから大規模系統の定態安定度を効率的に解析できる手法を開発せよ。」と命じられた。筆者は目を白黒させるばかりであったが、研究室の先輩であり、固有定態安定度解析においては第 1 人者であった長尾待士氏の指導を受けながら研究に着手した。

そのころ、EISPACK と呼ばれる固有値解析プログラムが、米国のアルゴンヌ国立研究所を中心とした世界的な共同開発プロジェクトで開発されていた。研究の第 1 段階は、EISPACK の QR 法を用いた定態安定度解析プログラムを開発することであった。この開発はうまくいった。50 機程度の系統であれば大型計算機によって 10 分程度で 500 個の固有値全てを高精度に求めることができた。しかし、

計算時間が次数の 3 乗に比例するため数百機以上のさらに大きな系統の解析は困難であった。

この壁を乗り越えるために、次に取組んだのは、固有値と固有ベクトルを利用した系統縮約手法（近似による次数低減法）の開発であった。しかし、高精度を保つのは容易でなく四苦八苦していた。

〈3・3〉S 法 どうすれば壁を突破できるか、おそらく寝ている間も考え続けていたと思うが、休暇で新幹線に乗っていたときのことである。新しいアイデアがふと生まれた。アイデアは思いついたが、書く紙が無い、そこで駅弁を買ってその包み紙の裏に、式を書いた。図も描いた。表には広島駅弁当、調製年月日、昭和 53 年 3 月 18 日、11 時 00 分と書いてあり、原爆の子の像などの写真が印刷してある。また、「お召し上がり後はくずもの入れにおしまい願います。」と書いてあるが今も大事に保管している。

S 法あるいは S 行列法は、大雑把に言うと系統の状態微分方程式を表す行列 A を次式

$$S = (A + hI)(A - hI)^{-1} \quad (\text{ただし } h \text{ は正の実数})$$

によって行列 S に変換し、絶対値最大の固有値を求めることにより、最も不安定な固有値を求める手法である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

包み紙には、変換後の行列は S でなく E と書いているが同じものである。この時を出発点として、S 法の実用化、改良、機能向上、固有値感度解析に基づく最適化手法の開発（例えば PSS など最適設計⁹⁾、予防制御など）など一連の研究を 20 年以上に亘って行うことになったのである。

最後に、S 法と名前をつけた理由に触れておきたい。3 つの理由がある。① QR 法の次に生まれたから QRS の S である。② Stability の頭文字である。③ 著者の恩師、関根泰次先生の頭文字である。

4. 解析システムとしての整備

本節で記述するのは、たとえばラーメンには「博多」とか「札幌」とか「喜多方」など多くがあるが、麺や叉焼や海苔はおおむね共通なので、これらを共通にしておけば何かと便利、という内容である。

系統解析における共通化というのは、解析プログラムもそうだが、ここでは主に解析のための入力データを指す。データの共通化は、複数の電力系統の連系で構成されているわが国の場合、有用というよりは不可欠に近い。たとえば電力系統が隣り合う A 社と B 社で連系線潮流の安定性を議論する場合、A 社と B 社で評価の“物差し”が異なれば議論は少なからずギクシャクしかねない。この場合、データそのものが物差しとなる。これを回避するには、双方で同一のデータを整備・使用するのがてっとり早い。

こうした共通データは、多くの技術者にとって扱い慣れていて、馴染みがあるのが好ましい。解析機能も重要だが、昨今の GUI などデータの操作性も劣らずあり難いのと似ている。

ここで、Y 法や S 法など安定度解析プログラムに用いら

図3 各種系統解析に用いられるデータ範囲
Fig. 3. Data for various analysis of power system.

れるデータの特徴について触れたい。これらのプログラム、不都合なことに、適当な数値を設定すればとにかく何らかの解は得られる(=数値が出る)というものではない。たとえば1つの送電線距離を10倍に誤入力するなど僅か1つのデータ値に起因して、解が得られない場合が往々にしてある。仮に安定度の動揺波形といった解が得られても、もしそれを妥当とみなせば問題は一層深刻である。

安定度解析に用いられる入力データの種類の、負荷特性や送電線・変圧器定数から原子力や火力発電のプラント特性まで多種多様であり、全体のデータ数はたとえばわが国の実系統でざっと数10万に達している。

一方、わが国では安定度解析ほど頻繁な利用の必要はないが、さりとてないとする実効値解析プログラムには次のようなものがある。

- 故障計算 (短絡電流計算)
- 電圧安定性計算 (一部の機能は潮流計算にも付加)
- 系統縮約計算

これらの計算に必要な入力データ種別をY法データと比較すると、イメージ的に図3のようである。Y法データは、各種系統解析に必要なデータをほぼ包含していることが分かる。上述のように、信頼に足る入力データ作成のための労苦は並大抵ではない。当然の成り行きとして、各々の解析に共通化できるものはできるだけ共通化しようとする考えが出てくる。そこで上記した各々の解析計算についても、基本的にY法データそのまま計算できるようにし、入力データから解析まで一体化したシステムとして整備した。

一昔前、わが国ではY法データとは異なる別のデータベースが開発されたことがあった。しかし年月を経て、次第に利用者から不便の声が多く聞かれるようになった。その最大の理由は、そのデータベース自体を直接的に解析に使うわけではなく日常的な必要性に乏しかったため、親近感を持たれなかったためである。

この点でY法データは、結果的にわが国電気事業で広く使われており、これを共通データとして扱うことに抵抗がないのが利点である。こうしたシステム化により、今日では各種の系統解析計算が容易かつ確実にできるようになっている。

5. おわりに

ここで紹介した、Y法、S法を中心とした解析システムは、

現在ではCPAT (CRIEPI's Power System Analysis Tools) として他の関連プログラム群も含めて整備され、電力会社での日々の解析業務に活用されている。

なお、これらのプログラム群の開発は一人ではなしえず、それぞれが分担して開発していった。本稿でも、〈2・4〉節と4章は田中が、3章は内田が執筆した。

最後に、プログラム開発に当たってご指導いただいた、関根泰次先生を始めとした諸先生方、実系統試験や実利用に当たってご協力いただいた電力会社の方々、また電中研の、上之蘭博氏、高橋一弘氏、坪井昭氏、植田清隆氏、堀内長之氏、長尾待士氏など諸先輩方に感謝の意を表します。

(平成19年10月31日受付)

文 献

- (1) 安定度総合解析システム開発グループ:「大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発」, 電中研総合報告, T14 (1990-4)
- (2) 「電力系統の安定度」, 電気協同研究, Vol.34, No.5 (1979-1)
- (3) 天野博之・井上俊雄:「非線形解析理論を用いた新しい制御系設計手法の開発—振動発散の抑制に有効な PSS 定数設定法—」, 電中研研究報告, R05003 (2006-3)
- (4) 「同期機励磁系の仕様と特性」, 電気学会技術報告, No.536 (1995-2)
- (5) 浅田 実・山下光司:「わが国 60 Hz 系統における負荷特性の実態分析」, 電学論 B, Vol.121-B, No.10 (2001-10)
- (6) 高橋一弘: 電力システム工学, オーム社 (1977)
- (7) 内田直之:「新しい固有値解法による電力系統の動的定常安定度解析」, 電学論 B, Vol.100-B, No.7 (1980-7)
- (8) N. Uchida and T. Nagao: "A New Eigen-Analysis Method of Steady-State Stability Studies for Large Power Systems: S Matrix Method", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PWR-3, No.2 (1988)
- (9) 吉村健司・内田直之:「多機系統ロバスト安定化のための P + ω 形 PSS 定数最適設計手法」, 電学論 B, Vol.118-B, No.11 (1998-11)

谷 口 治 人 (上級会員) 1975 年 3 月京都大学工学部電気系修士課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。2004 年 1 月システム技術研究所長(現職)。電力系統の計画・運用・制御, 新技術適用に関する研究に従事。工学博士。1997 年, 2003 年電気学会論文賞。1999 年電気学会進歩賞。2006 年電気学会著作賞受賞。CIGRE 会員。

田 中 和 幸 (上級会員) 1976 年 3 月九州大学大学院修士課程修了(電気工学)。同年 4 月電力中央研究所入所。1981 年 8 月~1982 年 9 月米国テキサス大学アーリントン校客員研究員。1991 年 10 月~1992 年 7 月九州工業大学客員助教授。2006 年 4 月~東北大学客員教授, 現在に至る。主として電力系統の計画・運用・解析に関する研究に従事。工学博士。1991 年電気学会論文賞受賞。

内 田 直 之 (正員) 1978 年 3 月東京大学大学院博士課程修了(電気工学専攻)。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。2000 年~2003 年東北大学客員教授。2002 年 4 月東京理科大学工学部電気工学科教授, 現在に至る。主として, 電力系統の解析・運用・制御に関する研究に従事。工学博士。1988 年電気学会論文賞受賞。IEEE シニア会員。