実時間シミュレーションを可能とする 電力系統解析シミュレータ

**Real Time Simulator for Power System Analysis** 

河合忠雄*	Tadao Kawai
後藤益雄**	Masuo Gotô
中村義輝***	Yoshiteru Nakamura
小西博雄****	Hiroo Konishi



関西電力株式会社 総合技術研究所納め電力系統シミュレータの外観 世界最大級の系統解析シミュレータを示す。

今回開発した大規模系統解析用シミュレータは, 従来困難とされていた発電機や負荷特性の模擬にマ イクロコンピュータを適用することによって設備を 小形化し,発電機台数が30台程度までの電力系統の 実時間シミュレーションをできるようにしたもので ある。

さらに運転操作性を向上させるため,大形計算機

え,入力データの設定,回路構成の決定,解析デー タの編集などを自動化した。

このシミュレータの完成により,これまでディジ タル解析に依存していた多機系の現象解析が実時間 ベースで再現できるようになり,よりリアルな現象 把握や新しい電力系統の制御システムの開発が容易 になった。

73

とワークステーションによる運転支援システムを備

## \* 日立製作所 国分工場 \*\* 日立製作所 電力事業部 工学博士 \*\*\* 日立製作所 大みか工場 \*\*\*\* 日立製作所 日立研究所 工学博士

# 1 はじめに

電力系統に発生するさまざまな現象解析の手段とし て、古くは交流計算盤やMG式発電機を接続した模擬送 電線を使用したシミュレーションが広く行われてきた。 最近は、電子計算機の利用が進み、ディジタルシミュレ ーション技術が大きな発展を遂げてきた。一方, 電力需 要の増加に伴い, 電力系統は年々拡大し複雑化してきて いる。そのため各種安定度問題の評価や、新しい制御保 護システムの開発,導入効果の検証も難しくなってきて いる。さらに、直流送電や各種新エネルギー電源を中心 として、サイリスタ変換器を利用した電力機器の導入が 電力系統の需給対策や広域安定運用のため広く検討され ている。そのため、従来の定式化されたディジタルシミ ュレーション技術だけでは対応が困難となってきてい る。そこで、このディジタルシミュレーション技術を補 完するものとして,高性能アナログ形シミュレータの必 要性が最近再び高くなってきた。

今回開発した系統解析シミュレータは,この両者の欠 点を補うもので広範囲の時間領域の現象を統一的に解析 評価することをできるようにするとともに,現象を実時 間で模擬することによって,感覚的な現象把握や実際の 制御保護装置を接続した動作検証を行えるなどの特徴を 持っている。

# 3 シミュレータ要素モデルの特徴

系統解析シミュレータは,実際の電力系統と同じく発 電機,負荷,送電線などの要素モデルの集合体となって いる。この章では,代表的な要素モデルの構成と特性例 について述べる。

## 3.1 発電機モデル

発電機モデルは、5台の32ビットマイコンを組み合わ せたマルチCPUディジタルコントローラを中心に、電子 リアクトル、出力アンプ、所内負荷モデル、連系用変圧 器モデルおよび遮断器モデルによって構成され、1台で 発電所としての基本機能を具備している。その外観を 図2に示す。おのおののマイコンは、同期機特性演算部、 AVR(自動電圧調整器)-GOV(スピードガバナ)部、軸特 性模擬部、プラント特性部および保護リレー部に機能分 割され、電気角で30度周期の演算を行うことによって動 特性の模擬を行っている。同期機特性は、よく知られた

日立製作所では、従来のアナログ形シミュレータで規 模拡大および等価性実現に大きな制約となっていた発電 機,負荷モデル部をマイクロコンピュータ(以下、マイコ ンと略す。)技術を適用しディジタル化することによって、 小形かつ高精度の大規模系統解析用シミュレータを開発 した。今回実用機として関西電力株式会社総合技術研 究所および中部電力株式会社系統解析センタに納入し た系統解析シミュレータの概要について以下に述べる。

# 2 系統解析シミュレータの目的

電力系統は、50/60 Hzを基本とした三相交流回路に起 因する数ミリ秒から数十ミリ秒までの短時間の過渡現象 から、発電機間の安定度問題、さらには電力潮流制御あ るいはAFC (Automatic Frequency Control:自動周波 数制御)などに関する数分から数十分までにわたる長時 間現象の広い範囲の現象解析を必要としている。これら の各種系統現象と解析技術の関係を図1に示す。同図に 示すようにディジタルシミュレーションは、すべての現 象に対し共通に対応できるプログラムはなく、おのおの の事象に適合したシミュレーション手法を選択すること によって解析を行う、いわば専門家的解法である。一方、



従来のアナログ形シミュレータでは大きなネットワーク モデルを組むことができず, 簡略化した小規模モデルで の検証に限られるため, 複雑な系統の解析ができないと いう限界があった。

74

 10<sup>-4</sup> 10<sup>-3</sup> 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 1s 10 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>4</sup> (∞) 周期 T (min) (h) (d)
 注:略語説明 EMTP (Electro Magnetic Transient Program)
 図Ⅰ 電力系統現象と解析手段 系統解析シミュレータは、 広範囲の電力系統現象の総合シミュレーションを実現する。 パーク方程式を実時間で演算することによって実現して おり、さらに誘導機特性もソフトウェアの切換で容易に できるようにしている。また、各種機器定数や制御定数 も、ディジタル解析と同様に広い範囲の値を設定でき、 従来のシミュレータに比べシミュレーション精度の大幅 な向上を図っている。

図3は,解析例として発電機モデルの軸ねじれトルク 特性試験時のオシログラフ出力とEMTP(Electro Magnetic Transient Program)解析結果の比較を示したもの である。

## 3.2 負荷モデル

電力系統に接続される負荷は,誘導電動機から電灯負荷,エアコンのようなさまざまな電圧,周波数特性を持つ負荷の集合体と考えることができる。今回開発した負荷モデルは,これらの負荷特性をマクロに表現し,その

電圧,周波数特性をマイコンで演算し,電子回路によっ て消費電流を制御する方式とし,複雑な負荷特性をディ ジタル解析と同じように模擬できるようにした。その構 成を図4に示す。また図5は,負荷モデルと発電機モデ ルを組み合わせた電圧安定度評価試験の結果の一部を示 したものである。このように,従来の抵抗やリアクトル を組み合わせたパッシブな回路モデルではできない解析 も可能となった。

その他,このモデルは周波数リレーによる負荷遮断模 擬や電圧低下時の部分負荷脱落などの模擬も可能であ り,系統安定化システムの評価も容易にできるようにな っている。

## 3.3 HVDC, SVCモデル

HVDC(High Voltage Direct Current)送電用交直変 換器やSVC(Static Var Compensator)などのサイリス 夕応用機器は、その転流時の波形や応答が電力系統に及



ぼす影響も無視できない。したがって、シミュレータモ デルとしては図6に示すように実際の回路と等価な回路 モデルを実現し、電子回路による損失補償を行っている。 また、これらの変換器を制御する制御系の動作も忠実に



注:略語説明 マイコン(マイクロコンピュータ)

図 2 発電機モデルの外観 5 台の32ビットマイコンにより,制御される発電機モデルは,AVR(自動電圧調整器),GOV(スピードガバナ),軸特性などを含めたシミュレーションが可能である。

0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.3 時間(s) 注:略語説明 Nm (Newton meter)

75

図3 発電機の軸ねじれトルク時の試験結果例 シミュレ ータモデルと代表的ディジタル解析プログラム(EMTP)の出力比較 を行った結果を示す。



図4 負荷モデルの構成 負荷の電圧,周波数特性をマイコン で演算し、母線から吸収する電流を制御する。

-O DC 0-> 損失補償回路

(a) 交直変換器モデルの構成

Tr

СВ

0

AC

7

1

ル

タ

操作

-0

DCL

000

バルブ

AA-O

サイリスタ

モデル

ф

ディジタル制御装置





注:略語説明 V.I.P (電圧,電流,電力) Xe(連系リアクトル)

76

図5 負荷モデルを使用した電圧特性試験例 負荷の電圧 特性機能により,電圧安定度限界の評価を行った試験時のオシログ ラムを示す。

模擬できるようにディジタル制御装置を組み込んでい る。



(b) サイリスタバルブモデルの構成

注:略語説明 DCL(直流リアクトル)

図 6 HVDC用交直変換器モデルの構成 12相構成の一端局 分の変換器を縮小モデルとして実現した。サイリスタ素子を使用 し、回路現象を再現するとともに損失補償を行っている。

SVCの模擬も可能である。

#### 3.4 その他のモデル

以上のほかに変圧器,送電線,調相用コンデンサ,リ アクトル, SrC(直列コンデンサ), SDR(制動抵抗), 遮断 器などの要素モデルも同時に開発しており, さらに保護 リレー,系統安定化システム,自動周波数調整装置など の系統制御保護システムの機能をも組み込むことによ り、単なる電力系統の回路現象を模擬するだけでなく、 より現実的かつシステム的な系統シミュレーションが可 能である。

#### 大規模系統解析シミュレータの運転操作 4

今回開発したシミュレータの特徴は、発電機30台、負

さらに最近のGTO(Gate Turn Off)サイリスタを使用 した自励式変換器を模擬するために, 電圧形自励式変換 器モデルも開発した。このモデルの直流側に定電圧源を 接続すれば、各種電池電源のシミュレーションや自励式

荷20~40台,送電線150~300台など,従来のシミュレー タの5倍から10倍の機能を持つ点にある。このように多 数のモデルを使用して, 各種シミュレーションを効率的 に行うために,大形の電子計算機とワークステーション

を組み合わせた運転支援システムを構築した。

4.1 全体構成

各モデルと運転支援用計算機の関係を示す全体構成を 図7に示す。解析者はワークステーションから必要デー タを入力すると、単位系、定数変換などをホスト計算機 で自動的に行い、伝送回線を介してモデル内のマイコン に設定する。一方、シミュレーション時の操作は時間精 度の高い分解能(1ms)を必要とするため、高速処理が可 能なシステム制御装置により、あらかじめワークステー ションから設定された手順に従って自動操作を行うよう にしている。

また,シミュレーション中の各部の波形は,0.1~100 kHzサンプリングが可能なデータ収録装置内のメモリ にいったん記録し,シミュレーション終了後ホスト計算 機へデータを転送し,波形の表示,分析および保存を行 う方式とし,ホスト計算機の負担を軽減している。 慮した。また,系統図から入力された情報によって適切 なモデルの選択演算を行うことで回路条件の作成作業を 大幅に軽減した。その他,シミュレーション中の発電機 出力や母線電圧などのトレンド表示もでき,長時間のシ ミュレーション中の状態監視を行い,リアルな系統の動 きをワークステーション上から確認でき,必要によって 解析者が割込操作を行い,臨機応変なシミュレーション もできるようにしている。

## 4.3 ディジタル解析による支援機能

さらに,このようなシミュレータを運用するにあたり, 必要な定数の算出,予備的なディジタルシミュレーショ ンによる初期値の設定を行うなどの支援機能を追加し, シミュレータ利用の容易化を図った。その主な機能は, (1)潮流計算,系統縮約計算,(2)過渡安定度計算,(3)送電 線定数計算,(4)故障電流計算,(5)周波数特性解析,(6) HVDC特性解析などがある。これら解析には,米国BPA (Bonneville Power Administration:ボンネビル電力 庁)の開発したEMTPやユーザー所有の解析プログラム を利用し,汎(はん)用性のあるものとした。また,これ らの支援機能は、シミュレータ運転用のワークステーシ ョンを共有しデータの共通利用を図っている。また、こ

77

## 4.2 ヒューマンインタフェース

ワークステーションからのデータの入力は,図8に示 すように系統図や制御系ブロック図をベースに行うこと により,解析者はディジタルシミュレーションとほとん ど同じような感覚でデータの設定,操作が行えるよう配



注:略語説明 SC, ShR (調相用コンデンサ,リアクトル), FEP (フロント エンド プロセッサ), WS (ワークステーション)

図7 系統解析シミュレータの全体構成 ホストコンピュータに接続されたワークステーションからほとんどのシ ミュレータ操作を行うことができる。





図8 ワークステーションの操作画面例 シミュレータの操作は、ワークステーションによってディジタル解 析イメージで実行する。

れら支援機能は単独でも利用できる。

5 おわりに

関西電力株式会社および中部電力株式会社へ納入した 大規模系統解析シミュレータを中心とした最近のシミュ レータ技術について述べた。年々複雑化する電力系統の 現象を的確に把握するために,シミュレーションは有効 な技術である。従来のシミュレータは回転機を使用した ものが主流であったため,運転保守が繁雑で大規模な系 統シミュレーションには不向きであった。今回述べたマ イコンを適用したシミュレータは,このような問題を解 決し,新たな系統解析ツールを提供したと言える。 このような系統解析シミュレータで、今後さらにマイ コンの適用範囲を広げ、送電線や変圧器モデルなどへの 適用も検討しており、いっそうの運転保守性能の向上と 小形化が期待される。

電力系統の解析は今後もますますその重要性を増して くると考えられる。解析ツールとして,ディジタルシミ ュレーションだけでなく,このようなシミュレータもお 互いの不足分を補完するために今後も必要性は高く,積 極的な技術開発を継続していく予定である。

終わりに,今回の開発および実用化に際し,ご指導い ただいた関西電力株式会社および中部電力株式会社の関 係各位に対し深く感謝する次第である。

## 参考文献

78

1) T. Machida, et al. : Development of AC • DC Power

WM No.WM181-0

System Simulator, CRIPI REPORT No.117(1984-6)
Y. Kokai, et al. : Multiprocessor Based Generator Module for Real Time Power System Simulator, '88IE<sup>3</sup>  H. Doi, et al. : Advanced Power System Simulator, '90IE<sup>3</sup>WM No.WM242-8PWRS