マルチプロセッサを用いた電力系統シミュレータ 用発電機モジュールの開発

正員 小 海 裕 (日 立)
正員 真 鳥 岩 男 (日 立)
正員 川 上 潤 三 (日 立)

1. ま え が き

電力系統における異常現象の原因解明や、新形の保護制御装置の実証試験を目的として、アナログシミュレータによるリアルタイムシミュレータ解析が行われてきた⁽¹⁾。実系統の大容量発電機の動きを模擬するため、従来のアナログシミュレータでは、小形の発電機を用いていたが、過渡時の時定数、過渡インピーダンスと定態インピーダンスの比率および損失などを実機並にすることができない欠点があった。このため最近ではオペアンプなどの電子回路素子を組合せ、損失補償回路を付加した電子式アナログシミュレータが利用されるようになった⁽²⁾⁽³⁾。しかしながら、このようなシミュレータでは発電機部分も電子式アナログ回路で構成するため、発電機端子における電圧、電流を所定の大きさに設定するのに多くの手間を要し、設定精度も十分でないという問題が考えられる。特に、模擬系統の規模が大きく発電機台数が増えると、初期潮流条件設定が困難になると思われる。

このような背景から、送電線などの主回路を電子式のアナログ回路で模擬し、発電機部分はマイクロコンピュータでデジタル的にシミュレーションする新形の電力系統リアルタイムシミュレータの開発を行ってきた^{(4)~(7)}。この新形シミュレータは、計算機を用いてデジタル的に発電機モジュールの出力電圧を調整することにより、潮流計算で求まる電力系統の初期状態を速やかにしかも精度良く設定できる特長を持って

いる。また、発電機モジュールのプログラム変更により、任意の形の発電機を精度良く模擬できる特長を持っている。

本論文では、このデジタル式の発電機モジュールの高機能化の具体的手法について述べる。特に、発電機の動きを高速に演算し、精度良く模擬するために、新たにマルチマイクロプロセッサからなるマイクロコンピュータを用い、発電機の計算式を並列演算する手法を開発した。シミュレータの精度については、電力系統解析に広く使用されているシミュレーションプログラムである EMTP (Electro Magnetic Transients Program)⁽⁸⁾によるシミュレーション結果と比較評価した。

2. シミュレータの構成

〈2・1〉 電力系統シミュレータの構成例 今回開発した電力系統シミュレータの構成例を図1に示す。このシミュレータでは、マルチマイクロプロセッサにより発電機部分を模擬し、交流送電線や変圧器などの

図1 電力系統リアルタイムシミュレータの構成例

Fig. 1. Configuration of real-time power system simulator.

Development of Multiprocessor Based Generator Module for a Real-time Power System Simulator. By Yutaka Kokai, Member, Iwao Matori, Member, Junzou Kawakami, Member (Hitachi, Ltd.)

小海 裕: 正員, 日立製作所日立研究所
真鳥岩男: 正員, 日立製作所日立研究所
川上潤三: 正員, 日立製作所日立研究所

送電系統は損失補償回路を付加したアナログ電子回路で模擬している。この損失補償回路は、模擬対象となる回路要素と直列に補償電源を設け、損失分に相当する逆電圧を発生することにより、損失を補償をする方式を用いている⁽⁶⁾。このシミュレータの定格電圧電流は、20 V、0.2 A であり、装置自体もコンパクトなものになっている。今回開発したシミュレータの主な要素は、発電機ユニット 4 台、交流送電線ならびに直流送電線ユニット各 4 台、変圧器ユニット 12 台、交流変換装置ユニット 4 台、更に負荷および調相ユニット各 4 台である。ホストコンピュータは、各発電機モジュールにつながり、初期潮流状態を設定するための設定値や、シミュレーション結果の編集などを行う。

〈2・2〉 発電機モジュールの構成 このシミュレータの特長であるマイクロコンピュータによるデジタル形発電機モジュールについて詳述する。

図 2 に、今回開発した電力系統シミュレータにおける発電機モジュールの回路構成を示す。この発電機モジュールは、送電系統を模擬する電子式アナログ回路に接続され、発電機の動きをリアルタイムにシミュレーションする装置である。その動作シーケンスを説明すると以下となる。

発電機端子における三相の電圧電流は、シミュレーション刻み Δt ごとにサンプリングされ、A/D 変換される。マイクロコンピュータは、それらの測定値に基づいて発電機の動特性を計算し、発電機の周波数 f 、位相角 θ および初期過渡リアクタンス背後電圧振幅 E'' の各指令値を三相正弦波電圧発生装置へ出力する。図 3 に、この三相正弦波電圧発生装置の回路構成を示す。この回路は、マイクロコンピュータから与えられる f, θ, E'' の各指令値に応じた三相交流電圧を、次式の形で作り出す一種の D/A 変換装置である⁽⁹⁾。

$$E_a'' = E'' \sin(2\pi f t + \theta) \dots \dots \dots (1)$$

$$E_b'' = E'' \sin(2\pi f t + \theta - 2/3\pi) \dots \dots \dots (2)$$

$$E_c'' = E'' \sin(2\pi f t + \theta + 2/3\pi) \dots \dots \dots (3)$$

上式中の指令値 f, θ および E'' の大きさは、1 回のシミュレーション刻み Δt の間は一一定であるが、三相正弦波電圧発生装置は、内蔵クロックの動きにより、100 μ s ごとに (1)~(3) 式に従って E_a'', E_b'', E_c'' の電圧値を作り出す。発電機の動作は、シミュレーション刻み Δt ごとに Park の方程式⁽¹⁰⁾を逐次解くことにより求められる。詳細な方程式は付録に示す。シミュレーション精度を良くするためには、このシミュレーション刻み Δt を十分短くすることが必要となる。このため、複数個のプロセッサを用いて発電機の動作

図 2 発電機モジュールの回路構成

Fig. 2. Generator module.

図 3 三相正弦波電圧発生装置の構成図

Fig. 3. Three-phase sinusoidal oscillator.

を並列演算し、このシミュレーション時間刻みを短縮する手法を開発した。

3. マルチプロセッサによる並列演算処理

〈3・1〉 発電機モジュールの処理内容 発電機モジュール中のマイクロコンピュータで実行する演算処理の内容を図 4 に示す。この図の処理フローは、シミュレーション時間刻み Δt ごとに繰り返される。1 回の処理フローは以下の通りである。

まず、発電機端子における電圧電流を測定し、発電機の回転座標系である $d-q$ 軸座標系上の値へ変換する。次に、発電機内部の磁束回路計算、励磁系と調速系などの制御系の計算を行い、更に、発電機回転子の運動方程式と内部誘起電圧の計算を行う。以上の処理は、1 シミュレーション刻み Δt 内に完了する必要があるが、図 4 中の $d-q$ 軸座標変換は三角関数計算を伴う変換であり、多くの計算処理時間を要する。更に、数十秒から数分にわたる長時間の電力系統の動きを正確にシミュレーションするためには、発電機の制御系を詳しく模擬することが必要である。このため、磁束回路、励磁系、調速系および運動方程式の計算では発電機 1 台当たり少なくとも 10 個の微分方程式を解くことが必要となる。以上の理由で、図 4 の計算処理は、現状の 16 ビットあるいは 32 ビットのマイクロプロ

図4 マイコンコンピュータの計算処理フロー
Fig. 4. Flow chart of generator simulation program.

セッサでも、かなりの負荷となる。

今回はマイクロプロセッサとして、産業用に広く使われているインテル社の16ビットマイクロプロセッサ8086を選定した⁽¹²⁾。また、発電機の動きを記述する微分方程式を精度良く短時間に解くために、浮動小数点演算コプロセッサ8087も使用している。1個のプロセッサセット8086/8087を用いて、図4の計算フロー中の各ブロックを1回実行するのに要する時間を実測すると、合計13msを要する。

一方、シミュレーション刻み Δt は、シミュレーション精度を良くするため、対象とする発電機系の中で考慮すべき最も小さな時定数よりも小さくしなければならない。文献(5)より、 Δt として20ms以下を選定すれば、システムの安定度解析のような場合には、ほぼ満足する精度のシミュレーションが可能であることがわかっていて。しかし、交流システムの不平衡事故時には、基本波の2倍調波が発電機出力に含まれるため、波形的な精度を増すためには、サンプリング定理より、システムの商用周波数である50Hzの4倍の200Hzより速く電圧電流をサンプリングし、シミュレーションを行うことが必要と考えられる。このため、マイクロコンピュータのシミュレーション時間刻み Δt は、5msより短くしなければならない。従って、1セットの3086/8087で13msかかる処理時間を、5ms以下に縮める新たな手段が必要である。

文献(11)では、マイクロプロセッサの能力不足を補うため、浮動小数点演算の代わりに整数演算を行う手法が取られている。しかし、整数演算を用いて発電機

シミュレーションを行うと、文献(11)に示されているように、整数演算によるけた落ちなどの問題のため、精度良い模擬ができない欠点がある。このため、浮動小数点演算を高速に実行することが必要となる。そこで本論文では、発電機の動作を記述する微分方程式を浮動小数点演算し、しかも複数のマイクロプロセッサを用いて並列演算することにより高速化を図る手法を考案した。

〈3・2〉 発電機シミュレーションにおける並列処理の検討

図4中の各ブロックの実行時間の合計を、シミュレーション刻み Δt の制約により5ms以内に縮めるため、複数のプロセッサによる並列処理を試みた。その際、以下の近似を行い並列処理を可能にした。本来、図4の各ブロックの処理は、1回のシミュレーション時間刻み Δt ごとに連立して解くべきものであるが、一部のブロックの処理では、1時刻前の値を用いて計算することにした。これは、 Δt がある程度小さくなれば、状態量のサンプルごとの変動は非常に小さくなり、ある時刻の値をそれより1時刻前の値で近似しても大きな誤差は生じないからである。特に微分方程式の解法が台形法の場合、解の絶対安定性により、この近似は問題ないものと考えられる⁽¹³⁾。そこで図4の計算フローを分割して、マルチプロセッサ上で並列処理することにした。

図4の各ブロックの処理時間と、ブロック間の入出力関係を考慮した結果、図5に示すように計算フローの順序を一部変更し、複数個のプロセッサを用いて並列処理を実行することを考案した。同図においては、シミュレーション時間刻みごとに、先ずマスタープロセッサがA/D変換を実行し、その後3個のスレーブプロセッサが並列動作する。これにより、1回の計算

図5 計算順序の変更

Fig. 5 Modified program flow for multiprocessing.

図6 各プロセッサの役割分担

Fig. 6. Task assignment of each processor.

を 5 ms 以下に縮めることが可能である。ただし、スレーブプロセッサ3が処理する磁束回路計算と運動系の計算では、入力値は1時刻前の値を近似的に使用することになる。しかし、前述のように、 Δt を小さな値に短縮することにより、この近似による誤差は問題なくなると考えられる。

図5に示す修正後の計算順序を実行するため、実際には図6のようなプロセッサの役割分担を考案した。マスタープロセッサは、発電機端子における電圧電流を測定し、A/D変換する。また、上位計算機とのデータ伝送からなるI/O制御および各スレーブプロセッサの動作監視を行う。これに対し各スレーブプロセッサは、発電機の動きを表す微分方程式の解法を行う。スレーブプロセッサ1は、 $d-q$ 軸変換と内部誘起電圧計算を実行するプロセッサ1、励磁系計算を実行するプロセッサ2、更に磁束回路、運動方程式、調速系計算を実行するプロセッサ3から構成されている。

(3.3) 並列処理のための同期化 図5に示す並列処理を行う場合、最も問題となったのは、どのようにプロセッサ間の同期を取るかということであった。今回のシステムでは、デバッグの容易さを考慮して、図6に示すように、共有メモリー上のセマフォ(Semaphore)と呼ばれるフラグ変数の値を、各プロセッサが独自に判断し同期を取る方式を採用した⁽¹⁴⁾。この方式では、プログラムが暴走したり、デッドロックに陥った場合共有メモリー上のセマフォの値を観測することにより、デバッグを容易に行うことができる。

図6では、3種類のセマフォを用いている。すなわち、マスタープロセッサとスレーブプロセッサ1との同

期用のセマフォ(S1)、マスタープロセッサとスレーブプロセッサ2の同期用のセマフォ(S2)、更に、マスタープロセッサと、スレーブプロセッサ3の同期用のセマフォ(S3)である。これらのセマフォにより、各プロセッサの状態は一義的に規定される。

一例として、スレーブプロセッサ3の動作を図6を用いて説明する。マスタープロセッサとスレーブプロセッサの同期用のS3があり、このセマフォS3の値により、スレーブプロセッサ3は、所定の処理を実行する。スレーブプロセッサ3がアイドル状態の時は、S3は0を仮定しており、マスタープロセッサは、S3が0になっていることを確認してスレーブプロセッサ3に処理要求を出す。マスタープロセッサがS3を1にセットすると、スレーブプロセッサ3は磁束回路の計算を開始する。そしてこの計算が終了すると、スレーブプロセッサ3はセマフォS3を0にもどす。次にS3が0に戻ったことをマスタープロセッサは確認し、S3を2にセットする。これにより、スレーブプロセッサ3は調速系の計算を開始する。以後同様のシーケンスを繰り返す。このように、マスタープロセッサは3個のセマフォS1, S2, S3の各値を逐次判断し、それらの値を変更することにより、各スレーブプロセッサの動作を制御する。

以上、説明した設計をもとに組み立てた発電機モジュールの計算機部の構成を、図7に示す。マスタープロセッサユニットと3個のスレーブプロセッサユニットは、共有バスを介して共有メモリーにつながっている。共有メモリーアクセス時のアービトレーションは、一般に使われているデジィチェーン方式を用いている。

各プロセッサユニットは、ローカルメモリーを持っており、共有メモリーへのアクセス頻度をできるだけ少なくするように、各プロセッサで実行するタスクの

図7 マルチプロセッサの構成図

Fig. 7. Configuration of multiprocessor system.

コード部とローカル変数はローカルメモリー上に配置した。一方、共有メモリー上には前述のセマフォのほか、A/D変換して取り入れた発電機電圧電流やシミュレーション経過時間などの、複数のプロセッサが必要とするコモン変数を配置している。言語としては、フォートランとアセンブラを併用している。また、8086/8087のクロック周波数は、8MHzである。

マスタプロセッサユニットは、上位計算機とデータの交換を行うためのインターフェースと、発電機出力端子における測定量を取り込むためのA/D変換器を備えている。また、各スレーブプロセッサユニットは、パラレルインターフェースを持ち、三相正弦波電圧発生装置へ指令値を出力する。

4. シミュレーション精度の比較

開発したシミュレータの精度を検討するため、各種の系統モデルにおいてシミュレーションを実施し、EMTPによるオフラインシミュレーションと比較した。

〈4・1〉 1線地絡事故の例 図8に示す系統モデルにおける、500kV送電線上の1線地絡事故をシミュレーションした結果について説明する。地絡は70ms間継続するものと仮定した。図9に、開発したシミュレータによるリアルタイムシミュレーションの結果を示す。事故中発電機端子電圧は、約0.7p.u.まで低下している。また、発電機出力には不平衡事故のた

図8 シミュレーションモデル系統図(その1)
Fig. 8 Model network (No. 1).

図9 シミュレーション結果(1線地絡事故, シミュレータ)
Fig. 9. 1 LG fault (Simulator).

図10 シミュレーション結果(1線地絡事故, EMTP)

Fig. 10. 1 LG fault (EMTP).

図11 シミュレーションモデル系統図(その2)
Fig. 11. Model network (No. 2).

め生じる2倍調波(100Hz)成分が重畳しているが、事故中を平均した出力は事故前より低下している。このため発電機は若干加速し、周波数は0.21Hz上昇している。

EMTPを用いて図9と同様のケースをシミュレーションした結果を図10に示す。図9のシミュレータの結果と同じように、事故中は電圧が低下し、また、発電機出力に100Hz振動が重畳しており、発電機周波数は0.20Hz上昇している。

図9と図10を比較すると、開発したシミュレータとEMTPの結果はほぼ一致していると考えられる。

〈4・2〉 3線地絡事故の例 図11の系統モデルを用いて、3線地絡事故についてシミュレーションを行った。このケースでは、特に発電機の周波数変化を評価するため、500kV送電線上の3線地絡事故が、270ms継続すると仮定した。

図12にリアルタイムシミュレーションの結果を示す。発電機端子電圧は事故中約0.5p.u.まで低下している。このため、発電機G1の出力は低下し、発電機G1の周波数は50.42Hzまで上昇している。一方、発電機G2の出力も若干低下しているが、周波数の変化は最大値で50.21Hzと小さい。270ms後に事故回線が遮断され、電圧が回復すると、事故中に発電機G1とG2の位相が大きく開いていたため、発電

図 12 シミュレーション結果 (3線地絡事故, シミュレータ)

Fig. 12. 3LG fault (Simulator).

図 13 シミュレーション結果 (3線地絡事故, EMTP)

Fig. 13. 3LG fault (EMTP).

機 G1 の出力は増加し、発電機 G2 の出力は減少し、開いた位相差を元に戻す同期化力が働いている。

図 13 に EMTP によるオフラインシミュレーションの結果を示す。発電機端子電圧および電流、更に各発電機の出力および周波数の変化の様子もほぼ図 12 のものと一致している。

以上説明した例以外にも、様々なケースにおいてシミュレーションした結果、今回開発したシミュレータ

の結果と EMTP によるオフラインシミュレーションの結果はほぼ一致していた。

5. おわりに

マルチプロセッサを用いて、発電機の動作をシミュレーションする新形の電力系統シミュレータ用の発電機モジュールを開発した。このモジュールは、発電機の動きを記述する微分方程式を、4 台のプロセッサにより並列演算処理し、高速なサンプリング周期で精度良くシミュレーションを行える特長を持っている。

今後は、より高い周波数領域の現象も解析できるようにするため、高速な 32 ビットマイクロプロセッサを採用すると共に、微分方程式の解法に必要な行列演算を、デジタルシグナルプロセッサなどの新しいプロセッサを用いて高速に解く手法の開発が必要である。

(昭和 62 年 8 月 24 日受付)

文 献

- (1) 後藤, 他: 「サイリスタ負荷群を有する同期発電機の過渡特性」, 電学論 B p. 609, (昭 54-9)
- (2) 富士時報: 多目的電力系統シミュレータ, 57, No. 10 (昭 59)
- (3) M. M. Gavrilovic, et al.: "Evaluation of Protective Relays and Systems with IREQ's Power System Simulator", SM of Canadian Electrical Association, March (1985)
- (4) 小海, 他: 「電力系統シミュレータ用の発電機リアルタイムシミュレーション手法の開発」 昭 61 電気学会大会 No. 1023
- (5) Y. Kokai, et al.: "A New Real-time Generator Simulation Method for an Electrical Power System Simulator" JSST Conference, July (1986)
- (6) H. Konishi, et al.: "Analog/Digital Hybrid Simulator for AC/DC Power Transmission System", IEEE Montech '86 (1986)
- (7) 小海, 他: 「電力系統リアルタイムシミュレータの開発」 昭 62 電気学会大会 No. 950
- (8) Bonneville Power Administration: "Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) User's Manual" (1980)
- (9) N. Mutoh, et al.: "High Response Motors" IECON, IE-33, No. 1 (1984)
- (10) C. Concordia: "Synchronous Machines" 1951 G. E.
- (11) S. R. Macminn, et al.: "Microprocessor Simulation of Synchronous Machine Dynamics in Real-Time" IEEE PICA, pp. 281 (1985)
- (12) Intel: "Component Data Catalog" (1982)
- (13) K. Saikawa, M. Goto, Y. Imamura, M. Takato, T. Kanke: "Real-time Simulation System of Large-scale Power System Dynamics for a Dispatcher Training Simulator" IEEE Trans Power Apparatus Syst. PAS-103, No. 12 (1984)
- (14) R. E. Filman, D. P. Friedman: 「協調型計算機システム」 McGraw-Hill, (1984)

付 録

発電機の動きを表す微分方程式は、以下のようになる。

磁束回路

$$\Psi ad = X^a ad(-Id + \Psi f d / X f d)$$

$+ \Psi 1d/X1d) \dots\dots\dots(\text{付 } 1)$
 $\Psi aq = X'' aq(-Iq + \Psi 1q/X1q)$
 $\dots\dots\dots(\text{付 } 2)$
 $I f d = (\Psi f d - \Psi a d)/X f d \dots\dots(\text{付 } 3)$
 $I 1d = (\Psi 1d - \Psi a d)/X1d \dots\dots(\text{付 } 4)$
 $I 1q = (\Psi 1q - \Psi a q)/X1q \dots\dots(\text{付 } 5)$
 $d \Psi f d / d t = R f d (E f d / X a d - I f d)$
 $\dots\dots\dots(\text{付 } 6)$
 $d \Psi 1d / d t = -R1d \cdot I 1d \dots\dots(\text{付 } 7)$
 $d \Psi 1q / d t = -R1q \cdot I 1q \dots\dots(\text{付 } 8)$
 ここで,
 $I d, I q$: d 軸, q 軸の電機子電流
 $I f d, I 1d, I 1q$: 界磁, d 軸, q 軸のダンパー電流
 $E f d$: 界磁電圧
 $R f d, R1d, R1q$: 界磁, d 軸, q 軸のダンパー抵抗

$X a d, X f d, X1d, X1q$: 空隙, 界磁, d 軸, q 軸のダンパーリアクタンス
 $\Psi a d, \Psi a q$: d 軸, q 軸の空隙磁束
 $\Psi f d, \Psi 1d, \Psi 1q$: 界磁, d 軸, q 軸のダンパー磁束
 運動系
 $M/\omega_0 \cdot d \omega / d t = T m - T e - P d \omega$
 $\dots\dots\dots(\text{付 } 9)$
 $d \delta / d t = \omega \dots\dots\dots(\text{付 } 10)$
 ここで,
 M : 慣性定数
 ω_0 : 定格角速度
 ω : 角速度
 $T m$: 機械的トルク
 $T e$: 電氣的トルク
 δ : 位相角
 $P d$: 機械的ダンピング定数