モード法による電力系統の新しい縮約論理

正 員 滝 本 昭 (電力中研)

Power System Dynamic Equivalence Based on a New Model
Reduction Technique

Akira Takimoto, Member (CRIEPI)

Power system dynamic equivalents play an important role in the effort to reduce the computational burden of the transient stability analysis of power systems. In this paper, the author proposes a new efficient practical algorithm for forming linear dynamic equivalents for power systems based on modal analysis. The main feature of the proposed method is that the accuracy of the equivalent model is highly improved by converting a coordinate system representing the subsystem from the R - J coordinate system of the main system to the reference generator's D - Q coordinate system of the subsystem. The order reduction is based on aggregation of similar modes and elimination of the inferior modes without significant effect on the frequency response of the subsystem. So the equivalent obtained by proposed method can be used for both steady-state and transient stability analysis studies.

In order to verify the dynamic equivalent's performance, stability simulation results for model power system composed of 16 generators are also shown.

キーワード：系統縮約，モード解析，過渡安定度解析

1. ま え が き

電力系統の広域運用を真に実効あるものとするためには、運用条件のパラメトリックな分析・評価が必要であり、これにはマン・マシン対話型安定度解析システムの構築が必須である。上記システムの実現には、現在のシミュレーション効率の2桁ほどの改善がかぎとなっており、これには計算機の進歩とソフトウェアでの対応が考えられるが、解析計算の並列処理の難しさから、モデル簡略化の重要性が高まっている。

これまでに提案されている縮約手法を大別すると、工学的手法^{(1)~(4)}と数学的手法^{(5)~(14)}がある。工学的手法に基づくものはこれまで我が国では広く実用に使われている⁽¹⁾。この方法は、計算自体は容易だが系統安定度を大きく左右する発電機制御系は計算機アルゴリズム上では考慮できないなどの欠点があり、対象系統に対する解析者の経験や洞察力に負うところが過大である。また数学的手法を用いたものは、基本的に上

記制御系を含む系統動特性のすべてを考慮できる特徴を有する。しかしながら、縮約対象系統に非線形性が強く現れる場合には精度が大きく損なわれるという欠点があった。

そこで本論文では、後者の数学的手法をベースとして高精度の系統縮約を可能とする新しい論理を提案する。提案手法では縮約前の動特性方程式を適当な座標系を用いて書き換えることにより、系統の非線形性が強く現れるようなシミュレーションにおいても、線形微分方程式で構成される本縮約モデルが生み出す誤差を大幅に低減した。また、従来法では単に劣勢モードを消去することにより方程式の次数を低減していたが、本手法では類似モードを集めて合併する新しい論理の開発により、従来法に比べ等価性に優れた縮約モデル化を可能とした。また、一般に工学的縮約手法では、発電機間のコヒーレンシーを考慮して縮約対象系統を選定する必要があるのに対し、本縮約論理ではコヒーレンシーを考慮しなくても縮約モデルの精度を損

なうことはない。ただし、発電機間のコヒーレンシーが弱い場合には、〈3・3〉節で述べる類似モードの合併が有効に行われず、縮約モデルの次数を大幅に低減することができない場合があるので注意を要する。

以下では、まず次章においてシミュレーション誤差低減のための動特性方程式の座標系の改良について述べる。次いで、第3章では類似モードの合併による縮約論理について記述する。最後に、第4章ではモデル系統への適用を通して本手法の有効性を例示することとする。

2. モデルの構築

〈2・1〉 基本方程式 一般に系統縮約が適用される部分系統は主系統内の事故点からは十分に離れており、状態変化は小さく、おおむね線形範囲と考えてよい。いま、図1のように縮約対象である部分系統と主系統とが幾つかの連系ノードを介して接続している系統を考える。この連系ノードの端子電圧・注入電流を入出力として部分系統の動特性を表し、これをある運転点で線形化したものが次式である。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{X} &= A \Delta X + B \Delta V_T \\ \Delta I_T &= C \Delta X + D \Delta V_T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $X = [X_1^T \ X_2^T \ \dots \ X_{mg}^T]^T$ 、 X ：部分系統全体の状態変数ベクトル、 $X_i = [\phi_{fdi} \ \phi_{kdi} \ \phi_{kqi} \ Sg_i \ \delta_i \ \dots]^T$ 、 X_i ：発電機 G_i の状態変数ベクトル、 mg ：発電機台数、 ϕ_{fdi} 、 ϕ_{kdi} 、 ϕ_{kqi} ：磁束、 Sg_i ：発電機滑り、 δ_i ：発電機内部相差角(ほかに制御系の状態変数も加わる)、 V_T ：連系ノードの端子電圧ベクトル、 I_T ：連系ノードの注入電流ベクトル、 A, B, C, D ：発電機モデル、座標変換式、送電網の代数式などからなる係数行列、 Δ ：線形化した運転点からの変化分

図1 主系統と部分系統
Fig. 1. Main system and subsystem.

この(1)式がモード法縮約の対象となる基本方程式である。

〈2・2〉 座標変換 一般に、部分系統内の電圧絶対値の変動はほとんどの場合に小さいとみてよいが、電圧位相角については、例えば主系統と部分系統の連系が不安定サイドに移行すればするほど大きく変動する。このことは、電圧実効値 V_T の変化が小さくても、この位相角の変動によって電圧変化分のベクトル ΔV_T が大きくなることを意味する。線形縮約モデルを用いたシミュレーションに誤差が増大する主たる原因はこれである。

系統動揺時の各発電機およびノードの位相角の状態変化について考えると、主系統内の事故点から十分に離れた部分系統内では一般に各発電機の位相角は似通った動きになることがいえる。換言すれば、部分系統内での発電機間の相対的な変動は比較的小さい。日本の長距離くし形系統のような場合は特にその傾向が強い。この特徴は部分系統内のノード電圧位相角についても同様である。

以上のことを図2を用いて説明する。いま、部分系統内に適当な基準発電機 G_s を選び、連系端子電圧 V_T を G_s の D - Q 座標軸基準で見たものを V_s とする。故障発生前の初期状態でのこれらの電圧 V_T^0 、 V_s^0 は一致している。この状態で故障が発生した後のある

(a) R-J 座標系からみた電圧変化

(b) D-Q 座標系からみた電圧変化

図2 異なる座標系からみた電圧変化
Fig. 2. Voltage change on R-J axes and D-Q axes.

時点での電圧を V_T, V_s とする。(a) 図の系統基準座標で見た場合は、 V_T の絶対値の変化は小さいものの位相角の変化が大きいため、 ΔV_T は大きくなっている。一方、(b) 図の D - Q 座標で見た場合は、座標軸が電圧ベクトルと同じように回転するため ΔV_s は小さくなる。

このように(1)式に基づく系統縮約を行うにあたり、主系統は系統基準座標系 (R - J 座標系) のまま、部分系統だけをその系統内の適当な発電機を基準とした座標系 (D - Q 座標系) で記述し、 $\Delta V_s, \Delta I_s$ を各々入出力することにより、シミュレーション時に部分系統の状態変化が線形領域を逸脱することによって生じる誤差を低減することが可能となる。

座標変換の具体的な定式化について述べる。(1) 式の状態変数 X には発電機の内部位相角 $\Delta \delta_i$ ($i=1, 2, \dots, mg$; mg : 発電機台数) が含まれており、これらを(2)式で表される $\Delta \delta_{is}$ に置き換えることによって、(1)式は D - Q 座標系へ変換される。

$$\Delta \delta_i \rightarrow \Delta \delta_{is} = \Delta \delta_i - \Delta \delta_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\Delta \delta_s$: 基準発電機 G_s の内部相差角

具体的には、(1)式に含まれている $\Delta \delta_i$ に関する式(3)式を(4)式で置き換えればよい。これは係数行列 A, B, C を修正することによって容易に行われる。

$$\Delta \dot{\delta}_i = \Delta Sg_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta \dot{\delta}_{is} = \Delta Sg_i - \Delta Sg_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\Delta Sg_i, \Delta Sg_s$: 発電機 G_i および G_s の滑り

すべての $\Delta \delta_i$ について以上の変換を行うと、基準発電機 G_s の滑り $\Delta \delta_{ss}$ は常にゼロとなるため、状態変数ベクトル X から取り除くことができる。

座標変換後の状態方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{X}' &= A' \Delta X' + B' \Delta V_s \\ \Delta I_s &= C' \Delta X' + D \Delta V_s \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 X' : 座標変換後の状態変数、 V_s, I_s : 座標変換後の連系ノードの端子電圧、電流ベクトル、 A' : (2)~(4)式に従って A を書き換えた行列、 B' : B から $\Delta \delta_{ss}$ に関する行を取り除いた行列、 C' : C から $\Delta \delta_{ss}$ に関する列を取り除いた行列

$$\left. \begin{aligned} I_s &= I_r e^{-j\Delta \delta_s} \\ V_s &= V_r e^{-j\Delta \delta_s} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

状態方程式(5)式は座標変換式(6)を介して主系統と結合されるが、(2)~(4)式の変換によって $\Delta \delta_s$ は(5)式から失われる。このため $\Delta \delta_s$ はシミュレ

ーション中に ΔSg_s を積分して求めなければならないが、縮約後の状態変数ベクトル Y から ΔSg_s を取り出すのは困難である。そこで、 ΔSg_s と $\Delta X'$ の関係式(7a)式を(5)式に追加し、同式に対して縮約と同じ変数変換を施すことにより、縮約後は(7b)式から ΔSg_s を求めることが可能となる。

縮約前:

$$\Delta Sg_s = E \Delta X' = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0] \Delta X' \quad \dots\dots\dots (7a)$$

縮約後:

$$\Delta Sg_s = E' Y \quad \dots\dots\dots (7b)$$

ただし、 E : ΔSg_s に対応する要素が1で残りはすべてゼロの横のベクトル、 E' : 縮約後の係数ベクトル、 Y : 縮約後の状態変数

(5)式の行列 C' の最後の行として係数ベクトル E を加えたものを改めて C' とし、ベクトル ΔI_s の下に ΔSg_s を追加したものを出力ベクトルとして(7a)式を(5)式に組み入れたものが(8a)、(8b)式であり、これが次章で述べる縮約の対象となる。

$$\Delta \dot{X}' = A' \Delta X' + B' V \quad \dots\dots\dots (8a)$$

$$U = C' \Delta X' + D V \quad \dots\dots\dots (8b)$$

ただし、 $V = \Delta V_s$: 入力ベクトル、 $U = [\Delta I_s^T \ \Delta Sg_s]^T$: 出力ベクトル

3. モード法縮約論理

一般に数学的縮約法では、部分系統の動特性方程式を個々のモードに分離し、これらを優勢モードと劣勢モードに分け、劣勢モードを取り除くことによりモード数の削減を行う。このとき、通常は固有値が大きいモード、すなわち減衰が速いモードや振動周波数が大きいモード、各モードの定常ゲインに基づいて評価した影響度の小さいモードが劣勢モードとして選ばれる⁽⁶⁾。しかし、所要のモード数まで削減するために、減衰の悪いモードを単純に消去した場合には誤差が増大することは明らかである。

そこで本縮約論理では、部分系統内に固有値が似かよったモード(類似モード)が多数存在することに着目し、類似モードを合併することによりモードの周波数応答を損なわないように縮約を行う。これにより、消去には適さない減衰の悪いモードについても縮約の対象として考えることが可能である。これについては<3・3>節で定式化する。また、類似モードグループに含まれないモードについては、従来法と同じモードの消去を行い、モード数を低減している。

図3に本手法のフローの概略を示す。

図3 提案手法による系統縮約の流れ
Fig. 3. Outline of proposed method.

〈3・1〉 動揺モードの分離 (8a)式の行列 A' の固有値を λ_i ($i=1, 2, \dots, n$), 固有ベクトルを $\mathbf{p}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$), 更に $\mathbf{p}_i$ からなる行列を P とする。 $\Delta \mathbf{X}' = P\mathbf{Y}$ なる変換を (8a) 式に施し, 両辺に P^{-1} を左から乗ずることにより, (9) 式を得る。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Y}} = \Lambda \mathbf{Y} + \mathbf{B}'' \mathbf{V} \\ \mathbf{U} = \mathbf{C}'' \mathbf{Y} + \mathbf{D} \mathbf{V} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし, $\Lambda: \lambda_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) を要素とする対角行列, $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$, $\mathbf{B}'' = P^{-1}\mathbf{B}'$, $\mathbf{C}'' = \mathbf{C}'P$

この(9)式で, $\mathbf{B}''$ の行ベクトルを $\mathbf{b}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$), $\mathbf{C}''$ の列ベクトルを $\mathbf{c}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) とすると, 個々の動揺モードに分離された次式を得ることができる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= \lambda_1 y_1 + \mathbf{b}_1 \mathbf{V} \\ \dot{y}_2 &= \lambda_2 y_2 + \mathbf{b}_2 \mathbf{V} \\ &\vdots \\ \dot{y}_n &= \lambda_n y_n + \mathbf{b}_n \mathbf{V} \\ \mathbf{U} &= \mathbf{c}_1 y_1 + \mathbf{c}_2 y_2 + \dots + \mathbf{c}_n y_n + \mathbf{D} \mathbf{V} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

実数の固有値をもつ変数は各々一つの単調減衰モードを表し, 複素数の固有値をもつ変数は共役の固有値をもつ変数とともに, 対で一つの振動減衰モードを表す。

〈3・2〉 合併・消去による誤差の評価 本論文では, 各モードが部分系統の入出力特性に与える影響の大きさを評価する指標として, モード i を省略したときに生ずる誤差の上限値, すなわち共振周波数におけるゲインをもとに, (11) 式に示す簡便な計算式によって求めることができるモードの影響度 F_i を定義する。

$$F_i = \sum_{j=1}^n |b_{ij}| \sum_{k=1}^m |c_{ik}| / |\lambda_{iR}| \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし, b_{ij} : モード i の入力ゲイン, c_{ik} : モード i の出力ゲイン, λ_{iR} : モード i の固有値 λ_i の実部, m : 入出力ベクトルの次数

更に次式で定義される影響度関数 $F_i(s)$ をもとに, 消去・合併によって生ずる誤差を注目する動揺周波数において評価し, 消去・合併の可否の決定に用いる。

$$F_i(s) = (-F_i \lambda_{iR}) / (s - \lambda_i) \quad \dots\dots\dots (12)$$

(1) 消去による誤差の推定 モード i の消去によって生ずる誤差は (13) 式によって推定する。

$$\epsilon(s) = |F_i(s) - F_i(0)| \quad \dots\dots\dots (13)$$

(2) 合併による誤差の推定 いま, モード k がモード j に吸収される場合を考える。固有値を λ_j に置き換え, 更に定常ゲインが一致するように近似したモード k の影響度関数 $F'_k(s)$ は (14) 式で表される。

$$F'_k(s) = \frac{-F_k \lambda_{kR}}{s - \lambda_j} \frac{\lambda_j}{\lambda_k} \quad \dots\dots\dots (14)$$

(15) 式に示すように, もとの影響度関数 $F_k(s)$ と上記の $F'_k(s)$ との差を合併によって生ずる誤差の推定値として用いる。

$$\epsilon(s) = |F'_k(s) - F_k(s)| \quad \dots\dots\dots (15)$$

シミュレーション時に重視する動揺周波数 f が明らかな場合には $s = j2\pi f$ として, その周波数における誤差を評価する。あるいは消去・合併によって生ずる誤差の上限値を可否の判定に用いる場合には $s = \lambda_{iR}$ として共振周波数における誤差を評価する。

〈3・3〉 類似モードの合併による縮約 従来法の多くはモード消去の考え方にに基づき縮約を行うものである。すなわち, 全モードの中から保存する優勢モードを選び, 残りの劣勢モードについて微分項をゼロと置き, 方程式の低次元化すなわちモードの消去を行う⁽⁶⁾。消去されたモードは, 定常ゲインだけとなる。

$$\dot{y}_i = \lambda_i y_i + \mathbf{b}_i \mathbf{V} \rightarrow 0 = \lambda_i y_i + \mathbf{b}_i \mathbf{V} \quad \dots\dots\dots (16)$$

本縮約論理では, まず固有値が近いモードのグルー

図 4 合併・消去によるモードの周波数応答の変化
Fig. 4. Influence to the frequency response by aggregation and elimination of the modes.

プ、すなわち類似モードグループを探し、このグループを優勢モード群と劣勢モード群とに分ける。次に、劣勢モード群の固有値を優勢モード群の固有値で置き換えることにより、劣勢モード群は優勢モード群の中に取り込まれる。本論文では、これを類似モードの合併と呼ぶ。

類似モードグループの選定にあたっては、まず固有値間の距離が近いものを選んだ後で、前節で述べた誤差の評価法に従って合併による誤差を推定し、モード間の合併の可否を決定している。

消去されたモードの周波数応答はもとの応答と比べて図 4 (a) のように変化する。一方、モードの合併による周波数応答の変化は (b) 図のようになり、固有値が近いモードを選べば、単純な消去に比べて誤差が格段に小さい。

モードの合併について以下に定式化する。まず、前述の手順で (10) 式から類似モードのグループを取り出す。次に、このグループに含まれる全モードを〈3・2〉節の (11) 式で定義される影響度の大きい順に上から並べる。入力ベクトル v の次数を m とすると、上から m 個のモードを保存される優勢モードとし、残りを吸収される劣勢モードとする。類似モードグループを優勢モード群 (モード群 1) と劣勢モード群 (モード群 2) に分けたものが (17) 式である。ここで、(17) 式の行列 B_1 が正則とならない場合は、モード群 2 の中からなるべく影響度の大きいものを選び、 B_1 が正則と

なるように並べ換えるものとする。

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} v \\ u = [C_1 \ C_2] \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

ただし、 u, v : この系の入力ベクトルと出力ベクトル、 Λ_1 : モード群 1 の固有値を要素とする対角行列、 Λ_2 : モード群 2 の固有値を要素とする対角行列、 B_1, B_2, C_1, C_2 : 係数行列、 y_1 : モード群 1 の状態変数ベクトル、 y_2 : モード群 2 の状態変数ベクトル

$FB_1=B_2$ を満足する行列 F を用いて、 $y_1=z_1, y_2=Fz_1+z_2$ の変数変換を行うと、(17) 式は次式となる。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 \\ \Lambda' & \Lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B' \end{bmatrix} v \end{cases} \dots\dots\dots (18 a)$$

$$u = [C_1 + C_2 F \quad C_2] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18 b)$$

ただし、 $\Lambda' = \Lambda_2 F - F \Lambda_1, B' = B_2 - F B_1$

ここで、モード群 2 の固有値およびモード群 1 の固有値がすべて等しいと仮定すると、 $\Lambda' = \Lambda_2 F = F \Lambda_1 = 0$ となるため、(18 a) 式は次式となる。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 \\ 0 & \Lambda_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

その結果、状態変数ベクトル z_2 は入力信号 v によって全く励振されなくなり、その動きは z_1 の中に等価的に吸収される。すなわち、 z_2 は悪い影響なしに可制御量から除かれ、(19) 式は z_2 を消去した (20 a) 式と等価となる。また、系の定常ゲインを合併前と一致するように (18 b) 式を修正すると (20 b) 式を得る。

$$\dot{z}_1 = \Lambda_1 z_1 + B_1 v \dots\dots\dots (20 a)$$

$$u = (C_1 + C_2 \Lambda_2^{-1} F \Lambda_1) z_1 \dots\dots\dots (20 b)$$

モードの合併による縮約論理は文献 (13) の方程式の低次元化の処理と基本的に同じであるが、類似モードを対象としていることと、入出力の定常ゲインが一致するように修正を行っている点で精度的に優れている。

4. 試算例

本章では、我が国の広域運用でしばしば話題となる長距離くし形のモデル系統を用いた試算結果を通して、提案手法の有効性を検討する。

〈4・1〉 試算に用いたモデル系統 試算に用いたモデル系統は図 5 に示す 16 発電機 48 ノード 51 ブランチからなる系統である。発電機モデルは Park の詳

図 5 試算に用いたモデル系統
Fig. 5. Model power system.

表 1 本手法による縮約後の固有値
Table 1. Eigen values of the reduced model.

No.	実部 (1/s)	虚部 (rad/s)
1, 2	-0.2359210	± 1.094405
3, 4	-0.2869656	± 1.081210
5	-0.1035971	—
6	-0.1095536	—
7, 8	-0.0963966	± 3.758601
9, 10	-0.5270335	± 1.973548
11	-1.9283095	—
12, 13	-0.0942477	± 1.418617
14, 15	-0.8519999	± 1.030316
16, 17	-0.1611637	± 0.594891
18, 19	-0.2621219	± 0.577550
20	-0.6054477	—
21, 22	-0.2620088	± 0.635230

細同期機モデルに標準的な励磁系と調速機系モデルを加えたものを用いた。縮約の対象としたのは、図 5 中に破線で囲んだ発電機 12 機を含んだ部分系統で、動特性方程式の次数は 143 次となっている。

〈4・2〉 本手法による縮約結果 上記の系統に本手法を適用した結果を示す。類似モードグループの探索にあたっては、固有値間の距離が固有値の絶対値の 20% 以下のものを類似モードと判定した。固有値間距離の大きさの指定については、対象とする系統に応じて適当な値を選ぶ必要があり、今回の試算では上記の値を用いることとした。1～10 秒程度の周期の動揺現象を重視することとし、〈3・2〉節で述べた誤差の評価においては、0.1, 0.25, 1.0 Hz の三つの周波数について(13)式および(15)式により ϵ を求め、そのうちの最大の誤差に基づいて合併・消去の可否を決定した。

部分系統の 143 次の動特性方程式をモードに分離した結果、実数固有値をもつ単調モードが 47、複素数

表 2 縮約によるモード数の変化

Table 2. Number of modes after reduction.

(a) 単調モード

固有値の実部の値 (1/s)	消去によるモード数の 変化	合併によるモード数の 変化
~ -10.0	22 $\rightarrow$ 0	—
$-10.0 \sim -1.0$	13 $\rightarrow$ 1	—
$-1.0 \sim -0.1$	1 $\rightarrow$ 1	11 $\rightarrow$ 2
$-0.1 \sim -0.01$	—	—

(b) 振動モード

固有値の実部の値 (1/s)	消去によるモード数の 変化	合併によるモード数の 変化
~ -10.0	—	—
$-10.0 \sim -1.0$	25 $\rightarrow$ 0	—
$-1.0 \sim -0.1$	17 $\rightarrow$ 5	3 $\rightarrow$ 2
$-0.1 \sim -0.01$	3 $\rightarrow$ 2	—

(a) 数学的手法による縮約 (b) 工学的手法による縮約

図 6 縮約後のモデル系統図

Fig. 6. Figuration of reduced power system.

固有値をもつ振動モードが 48 対存在することがわかった。これに本手法を適用し 22 次まで縮約した結果、表 1 に示すとおり単調減衰モードの数は 4、振動減衰モードの数は 9 となった。

縮約前のモードを固有値の実部の大きさ、すなわち減衰の速さでグループ分けし、グループごとの合併・消去の様子を調べた結果を表 2 に示す。単調減衰モードと振動減衰モードのいずれについても、比較的減衰の速いモードが消去されており、残りの比較的減衰の遅いモードについて合併が行われていることがわかる。

〈4・3〉 従来法との精度の比較 前節で得た縮約モデルの精度を検証するために、図 5 の C 地点で三相地絡発生後、0.07 秒の時点で三相遮断するものとし、10 秒間の安定度シミュレーションを行った。

比較対象の従来法として、工学的手法と数学的手法の二つを選んだ。ここではそれらを各々従来法 1 と従来法 2 と呼ぶ。従来法 1 は広く実用に供されている文

図 7 工学的縮約モデルによる
シミュレーション結果

Fig. 7. Swing curve by physical reduced model.

図 9 本縮約モデルによるシミュレーション
結果

Fig. 9. Swing curve by proposed reduced model.

図 8 数学的縮約モデルによる
シミュレーション結果

Fig. 8. Swing curve by mathematical reduced model.

シミュレーション結果の一部を図 7～図 9 に示す。ここでは、図 5 中に矢印で示す発電機 A の内部位相角ならびにブランチ B を流れる有効電力潮流の動揺波形を選んだ。各図には、基準となる原データを用いたシミュレーション結果を一点鎖線で描き入れてある。図 7～図 9 の結果について、以下に考察する。

図 7 に示す従来法 1 の縮約モデルについては、原データの結果と比べて動揺現象を形作る主要な振動モードが欠落し、単純な動揺波形となっている点が特徴である。また、原データでは約 5 秒で発電機 A が脱調したのに対して従来法 1 の縮約モデルでは 4 秒ほど長くかかっており、実用面からは好ましくない楽観傾向の結果となっている。

図 8 に示す従来法 2 縮約モデルについては、主要な振動モードは保存されているが、動揺波形の振幅に誤差が見られる。これは、主として非線形性に起因する誤差であると思われる。発電機 A が脱調に至るまでには原データに比べて 4 秒以上よけいにかかっており、図 7 の従来法 1 と同様に安定側にずれた結果となっている。

図 9 に示す本手法による縮約モデルについては、従来法に比べて振動周期・振幅ともに誤差が少なく、脱調に至るまでの時間の違いも約 0.4 秒と小さい。

以上示したように、高い精度が要求される安定限界近傍でのシミュレーションにおいても、本手法による

献(1)の手法を用いた。従来法 2 は、本手法をもとに(2・2)節で述べた座標変換を行わず、モードの消去のみによって 22 次まで縮約したものを意味する。

本手法および従来法 2 により縮約された系統は図 6 (a)に示すような構成となり、従来法 1 により縮約された系統は(b)図に示すような小系統となる。

縮約モデルは従来のモデルに比べて格段に精度が優れていることが明らかとなった。

5. あとがき

本論文では、従来の縮約手法に比べて高い精度の等価縮約モデルを得ることのできる縮約論理を提案した。具体的には、従来の数学的縮約ベースに、次にあげる高精度化のための改良を行った。

(1) 縮約対象である線形の動特性方程式を部分系統内の発電機を基準とした座標系で記述することにより、従来の数学的縮約法の課題であった大外乱時のシミュレーション誤差の低減を可能とした。

(2) 本論理では類似モードの合併によるモード数の削減を新たに提案した。これにより、従来法でのモードの消去では対象とならないような減衰の遅い多くのモードも縮約対象可能となった。

(3) 本論理では合併・消去によって生ずるモードの周波数応答の誤差を所定の周波数において推定し、これを用いてモードの合併・消去の可否を決定している。これにより、シミュレーション解析時に所定の周波数成分についての誤差をなるべく抑えた縮約モデルの構築が可能となった。

更に、提案手法によるモデル系統試算を行い、脱調に至るような大外乱に対しても従来手法に比べて高い精度の動特性シミュレーションが可能であることを例示した。

最後に、本縮約論理のプログラム化およびシミュレーション計算にあたっては、関西電力(株)総合技術研究所 富山勝幸氏ならびに(財)電力中央研究所 竹中 清氏に多大な御協力をいただいた。ここに感謝の意を表したい。

(平成5年3月26日受付, 同5年6月2日再受付)

文 献

- (1) 植田, 他: 「動態安定度解析のための系統縮約論理」, 電中
研究報告, 181051 (昭57-7)
- (2) 井上: 「電力系統モデルの縮小に関する一考察」, 電気学会
情報処理研究, No. IP-75-23 (昭50)
- (3) S. Geeves: "A Model-Coherency Technique for Deriving
Dynamic Equivalents", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 3, No. 1
(1988)
- (4) P. M. van Oirsouw: "A Dynamic Equivalent Using Modal
Coherency and Frequency Response", *ibid.*, 5, No. 1 (1990)
- (5) 三谷, 他: 「電力揺動特性に着目した電力系統の等価縮約モ
デル」, 電学論 B, 109, 475 (平元-10)
- (6) 西田, 他: 「過渡安定度計算のための等価縮約モデルの一構
成法」, 同上 B, 102, 17 (昭57-1)
- (7) J. M. Undrill: "Dynamic stability Calculations for an
Arbitrary Number of Interconnected Synchronous
Machines", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-87,
No. 3 (1968)
- (8) J. M. Undrill: "Structure in the Computation of Power-
System Nonlinear Dynamical Response", *ibid.*, PAS-88,
No. 1 (1969)
- (9) J. M. Undrill, et al.: "Construction of Power System
Electromechanical Equivalents by Modal Analysis", *ibid.*,
PAS-90, No. 5 (1971)
- (10) J. M. Undrill, et al.: "Electromechanical Equivalents for
use in Power System Stability Studies", *ibid.*, PAS-90, No.
5 (1971)
- (11) B. D. Spalding, et al.: "Use of Dynamic Equivalents and
Reduction Techniques in Power System Transient Stabi-
lity Computation", PSCE B, Cambridge, Session 3-2, Paper
3-2/10 (1975)
- (12) W. W. Price, et al.: "Dynamic Equivalents from On-Line
Measurements", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-
94, No. 4 (1975)
- (13) W. W. Price, et al.: "Testing of the Modal Dynamic
Equivalents Technique", *ibid.*, PAS-97, No. 4 (1978)
- (14) C. Liu, et al.: "Two Reduced-Order Methods for Studies
of Power System Dynamics", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 3,
No. 3 (1988)

滝 本 昭 (正員)

昭和37年3月17日生。62年3月北海道大学大学院修士課程修了(電気工学専攻)。同年4月電力中央研究所入所。主として、電力系統の計画・運用・制御に関する研究に従事。

(1) 植田, 他: 「動態安定度解析のための系統縮約論理」, 電中