

# 電力系統過渡安定度解析システムの開発と過渡安定度教育訓練への応用

大阪職業能力開発短期大学校  
京 都 大 学

林 文 彬  
垣 本 直 人

## Development of Transient Stability Analysis Program for Power Systems and Its Educational Application

Bunhin LIN, Naoto KAKIMOTO

**要約** 近年、電気事業法の規制緩和により、コージェネレーションシステムを盛んに導入することならびに民間の企業は小規模な配電システムを建設することが可能になることから、特定電気事業に参入する業者は増えてくると予想される。このような社会情勢を背景として、安定な電力供給問題は、一般の電気技術者の身近な問題になる。本文では、これらのことから電気技術者の教育訓練用の系統過渡安定度解析システムを開発した。まず、特定電気事業の小規模システムモデルを想定して、その過渡安定度の評価にXd'モデル法に基づいてプログラムを作成した。本システムでは異なる系統および異なる故障箇所などに対応できるだけでなく、対話的な方式で計算中の故障箇所、計算時間の刻み、故障線の遮断と再投入時刻、さらに計算終了時刻のデータを学習者が自由に変更られるので、多様な安定度評価の結果を得られる。開発した安定度解析システムは、電力系統教育と安定度解析の学習教材として有効に活用できるものと考えられる。

### 1 はじめに

近年、省エネルギーが要求されており、発電に伴い発生する排熱を回収して利用するコージェネレーションシステムはエネルギーの総合利用率を高めることが可能のため、一般工場およびオフィスビルなどの電力・熱源として注目を集めている<sup>1)</sup>。さらに、電気事業法の規制緩和により、小規模な配電システムの建設が可能になることから、特定電気事業に参入する企業が増えてくるものと予想される。このような社会情勢を背景として、一般の電気技術者は安定な電力供給問題とシステムの安定度問題に対する関心が高まりつつあるように思われる。

本研究では、安定度解析手法を学習者が理解するために、特定電気事業の小規模システムモデルを想定して、その過渡安定度の評価のためXd'モデル法に基づく

過渡安定度解析システムを開発した。従来の過渡安定度計算プログラムでは、常に一つの系統および一つの故障パターンにしか対応できない。このため、異なる系統に安定度を解析するときは、プログラムの一部分を変更する必要がある。本システムでは、各配電線の回線数の判断、発電機と負荷の区別機能および故障時、遮断時、再投入時の系統のアドミタンス行列を発電機ノードに縮約する計算手法を開発したので、多様な系統および任意の故障箇所についてもプログラムを変更することなく計算できる。さらに、学習者は自由に故障箇所、計算時間の刻み、故障線の遮断、再投入、計算終了時刻などのデータを対話的な形で設定可能である。このため、電力系統の安定度学習に威力を発揮するものと考えられる。第2章では過渡安定度の計算方法について述べる。さらに、第3章では過渡安定度計算自動化の手法を提案する。第4章ではシステムの構成について説明する。第5章では本システムを実際の配電

系統に導入し、その最適な配電構成について検討する。  
第6章では結論を述べる。

## II 過渡安定度計算

### 1. 電力系統安定度問題

電力系統の安定度とは電力系統に加えられたじょう乱に対して、各発電機が同期運転を保ち、安定運転できる度合のことである。安定度は主として系統じょう乱の大小によって定態安定度と過渡安定度に分類される。定態安定度は、負荷や発電が微小に変化、あるいは、非常にゆっくりしたじょう乱に対して発電機の同期を保ち、安定に送電を維持できる度合をいう。また、過渡安定度は1線地絡、3相短絡などの大外乱発生時に、発電機へ入力する機械エネルギーと発電機から送電系統へ出力する電気エネルギーのアンバランスにより同期外れにいたることなく、安定に送電維持できる度合を表している。過渡安定度解析は、系統事故発生後生ずる動揺第1波から第2波までの動揺期間（1～2秒程度）が対象となる<sup>2)</sup>。

### 2. 過渡安定度計算法

例えば、図1(a)のような系統で、L1配電線に、時刻t=0秒で3相地絡（或いは短絡）故障が発生し、0.1秒でL1配電線を3相遮断し（図1(b)）、図1(c)に示すようにt=0.2秒で3相再閉路を行い、各発電機の動揺をt=1秒まで計算する場合には、全計算時間1秒を0.001秒刻みに分割し、各時間刻みごとに、発電機の運動方程式によって、発電機位相角と角速度を逐次計算する。

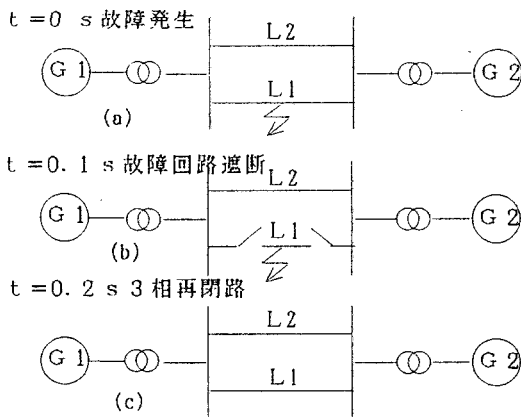


図1 故障系統

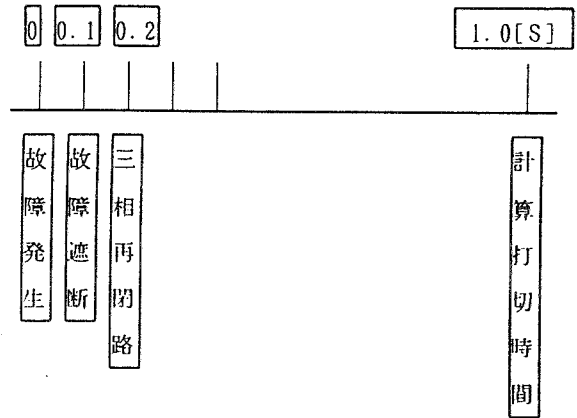


図2 故障シーケンス

また、過渡安定度計算のシーケンスは図2の示すようになる<sup>3)</sup>。

### 3. Xd' モデル法<sup>3)</sup>

Xd' モデルとは発電機の特性は直軸過渡リアクタンスXd' とその背後電圧（図3）で系統を模擬する方法である。図3において、過渡内部電圧Eは故障前

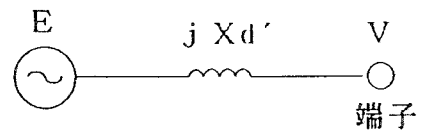


図3 Xd' モデル

の発電機端子電圧Vに、Xd' における電圧降下jXd' Iを加えたものとして求められ、その大きさEは動揺中一定とみなす。これは発電機の直軸と横軸の過渡リアクタンス [Xd' Xq] が等しく、すなわち過渡時の突極性を無視し、かつEを誘起する鎖交磁束Ψが動揺中変化しないものとみなしている。

発電機の運動方程式は、次のようになる。

$$\frac{M_i}{\omega_i} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{Mi} - P_i \dots \dots \dots (1)$$

ここに、Mi : 発電機の慣性定数

ωi : 定格角速度 = 2πf [rad/s]

$\delta_i$  : Eの位相角

PMI, Pi : 発電機の機械的入力, 電氣的出力

また、回転子の位相角動揺は近似的に  $\delta_i$  で表している。

### III 計算の自動化法

#### 1. アドミタンスの縮約計算

過渡安定度計算フローから、計算中の系統の状態は故障前から故障中、故障線遮断または故障線再投入などの変動がある。さらに、多様な系統と異なる系統結線にも対応できるため、系統のアドミタンスを発電機

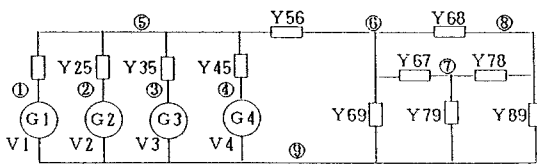


図4 系統の一例

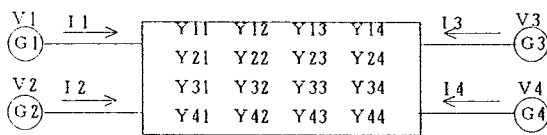


図5 アドミタンスを縮約した系統

ノードに縮約する計算は次の方法によった。

例えば、図4の系統の回路を図5のような2端子対回路のアドミタンスパラメータに変換する場合、アドミタンスパラメータは次のような式で表現できる。

すなわち、

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{I_1}{V_1} \Big|_{V_2=0, V_3=0, V_4=0} \\ Y_{21} &= \frac{I_2}{V_1} \Big|_{V_2=0, V_3=0, V_4=0} \\ Y_{31} &= \frac{I_3}{V_1} \Big|_{V_2=0, V_3=0, V_4=0} \\ Y_{41} &= \frac{I_4}{V_1} \Big|_{V_2=0, V_3=0, V_4=0} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

他のアドミタンスパラメータ ( $Y_{12}, Y_{22}, Y_{32}, Y_{42}, Y_{13}, \dots$ ) も同じような方法で計算できる。

#### 2. アドミタンスの縮約計算手法

本システムでは上記の概念により下記の手法をプログラムに組み込んで系統の回路定数を計算できる。

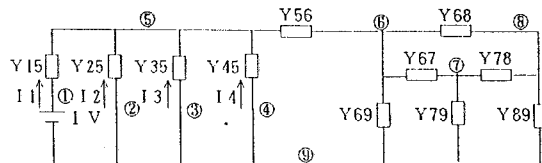


図6 アドミタンスパラメータ計算

まず、図4の  $G_1$  の電圧  $V_1 = 1V$  を、 $G_2, G_3, G_4$  の電圧  $V_2 = V_3 = V_4 = 0V$  を設定する (図6)。このようにすれば、次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} 0 &= -Y_{15}V_1 - Y_{25}V_2 - Y_{35}V_3 - Y_{45}V_4 \\ &\quad + (Y_{15} + Y_{25} + Y_{35} + Y_{45} + Y_{56})V_5 \\ 0 &= -Y_{56}V_5 + (Y_{56} + Y_{67} + Y_{68} + Y_{69})V_6 \\ &\quad - Y_{68}V_8 \\ 0 &= -Y_{67}V_6 + (Y_{67}Y_{78}Y_{79})V_7 \\ &\quad - Y_{78}V_7 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $V_1 \sim V_9$  はノード①～⑨の電圧、 $Y_{15}$  はノード①とノード⑤間のアドミタンスである。また、 $V_1 = 1(V)$ 、 $V_2 = V_3 = V_4 = V_9 = 0(V)$  とする。この連立方程式の解析により、各ノードの電圧  $V_1 \sim V_8$  の値が得られるので、下記のアドミタンスパラメータを求めることができる。

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{I_1}{V_1} = I_1 = \frac{V_1 - V_5}{Y_{15}} \\ Y_{21} &= \frac{I_2}{V_1} = I_2 = \frac{V_2 - V_5}{Y_{25}} \\ Y_{31} &= \frac{I_3}{V_1} = I_3 = \frac{V_3 - V_5}{Y_{35}} \\ Y_{41} &= \frac{I_4}{V_1} = I_4 = \frac{V_4 - V_5}{Y_{45}} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$G_1$  の次に、 $G_2$  の電圧  $V_2 = 1V$  を、 $G_1, G_3, G_4$  の電圧  $V_1 = V_3 = V_4 = 0V$  を設定して、 $Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}$  を求める。  $G_3, G_4$  の順に繰り返して計算すると、 $\square$  アドミタンスパラメータを計算できる。

本システムでは以上の方法により、実際に系統の配電線は地絡、遮断などの状態が変動しても、アドミタンス行列を発電機ノードに縮約する計算はそのまま実行できる。

### 3. その他の制約

システムを学習者の多様な指示に従って実行させるためには、故障、遮断、再投入などの系統状態変化を考慮する他に、以下の各制約条件も考慮して機能を追加しなければならない。

- (a) ノード間の結線状態の判断
- (b) 各配電線の回線数と回線数変動の対応
- (c) 無限大母線、発電機、負荷などの判断
- (d) 対話方式により遮断、再投入、計算終了時間の入力および故障場所の指定
- (e) 系統変動による送電線データ（アドミタンスなど）変動および各発電機の出力計算

### IV 開発したシステムの構成

本システムの構成は、図7となる。このとき、過渡安定度計算の概要は下記のとおりである。

- (1) 系統のノード（ノード名、電圧、有効電力、無効電力および発電機または負荷）およびブランチ（起点、終点、抵抗、リアクトル、対地容量、タップ、配電線の回線数）のデータをファイルから読み込む。
- (2) 潮流計算を行い、各ノードの電圧および角度を計算する。本システムではニュートン・ラフソン法で電力方程式を解析して潮流計算を行う。このとき、LU分解法を導入して計算の高速化を図っている。
- (3) 故障前系統のアドミタンス行列を発電機ノードに縮約する計算を行う。
- (4) 潮流計算の結果（電圧と角度）と縮約したアドミタンスの値から故障前の各発電機出力を計算する。例えば、図5の系統には発電機G1の出力は次式で計算できる。

$$P = Y_{11} V_1 V_1 \sin(\delta_1 - \delta_1 + \alpha_{11}) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\delta_1 - \delta_2 + \alpha_{12}) + Y_{13} V_1 V_3 \sin(\delta_1 - \delta_3 + \alpha_{13}) + Y_{14} V_1 V_4 \sin(\delta_1 - \delta_4 + \alpha_{14}) \dots (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= \pi / 2 - \theta_{11} \\ \alpha_{12} &= \pi / 2 - \theta_{12} \\ \alpha_{13} &= \pi / 2 - \theta_{13} \\ \alpha_{14} &= \pi / 2 - \theta_{14} \end{aligned}$$

ただし、 $\delta$  は発電機の内部相差角、 $\theta$  はアドミタンスの相差角である。

また、発電機G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>、G<sub>4</sub>の出力も同じような方

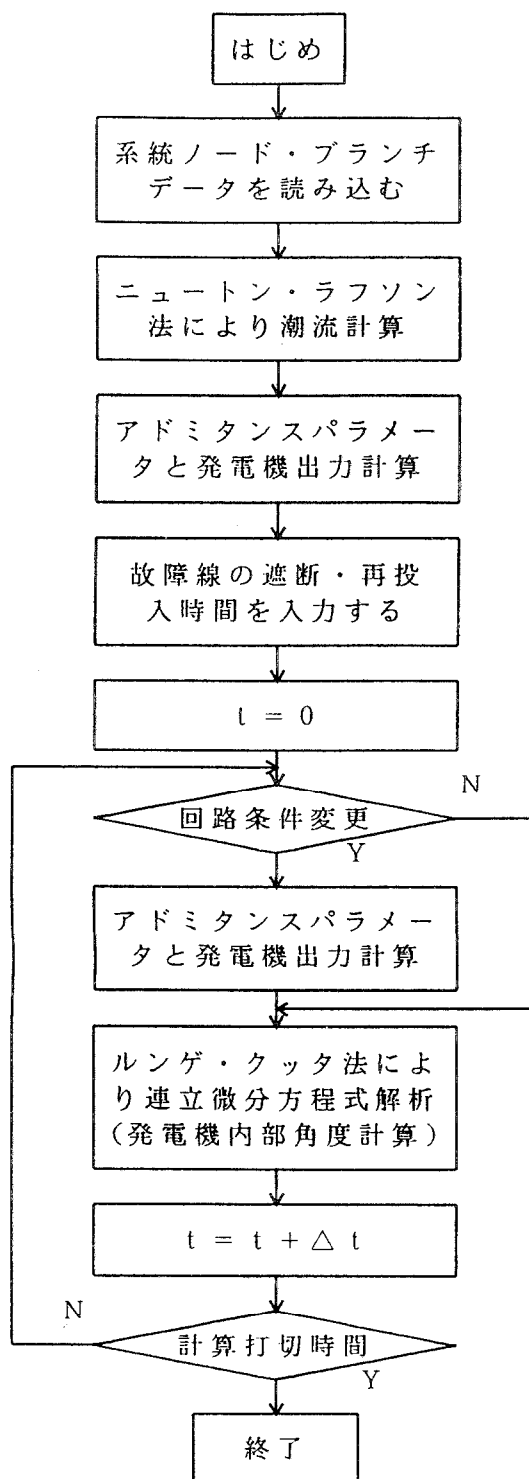


図7 プログラムの概要

法で計算できる。

- (5) 対話の方式で配電系統の故障線路、故障除去時間、再投入時間および連立微分方程式の計算時間刻みと計算終了時間を入力する。

- (6)(5)の故障線路に基づいて故障中、故障除去、および再投入後のアドミタンス行列を発電機ノードに縮約する計算を行う。
- (7)(6)により計算した回路定数から各発電機の出力を計算する。
- (8)発電機の出力を下記の発電機の特性を表す運動方程式に代入する。そしてルンゲ・クッタ法によりこの連立微分方程式を解いて  $\Delta t$  秒後の発電機内部角度 ( $\delta_i$ ) と角速度 ( $\omega_i$ ) を求める。

$$\frac{d \delta_i}{d t} = \omega_i$$

$$\frac{M_i}{\omega_i} \frac{d \omega_i}{d t} = P_{Mi} - P_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

- (9)時間を  $t = t + \Delta t$  にセットする。
- (10)  $t < T_{max}$  (計算終了時間) ならば、(6)にもどり、また、故障除去時間と再投入時間に合わせて、 $\Delta t$  後の諸量を計算する。

## V シミュレーション結果

### 1. システムとの対話

例えば図8のようなシステムをシステムに計算させるには、まず、ノードのデータを

'G1'            1.0 0.15 0.1 3

'ビル1母線'    1.0 -0.27 -0.1 1  
 の形で、ブランチのデータを  
 'コージェネ母線' '連系母線' 0.001 1.013 0.02 1  
 2の形でシステムに入力する。ここで、ノードのデータは”ノード名,電圧,有効電力,無効電力,ノード別(発電機は1、無限大母線は2、負荷は3)”である。また、ブランチのデータは”起点ノード,終点ノード, r, x, c, tap, 配電線回線数”である。

つづいて、システムは  
 \*\*\*系統の地絡個所を教えてください\*\*\*  
 というメッセージが出てくるので、学習者は  
 ”コージェネ母線 連系母線”  
 を入力すれば、システムは自動的にコージェネ母線と連系母線との間の配電線に地絡が発生するということを認識する。さらに、システムは  
 \*\*\*計算時間のきざみを入力して下さい\*\*\*  
 \*\*\*故障除去時間を入力して下さい\*\*\*  
 \*\*\*再投入時間を入力して下さい\*\*\*  
 \*\*\*計算終了時間を入力して下さい\*\*\*  
 などのメッセージが出てくるので、学習者はそれぞれのデータを入力して、過渡安定度の計算が始まる。

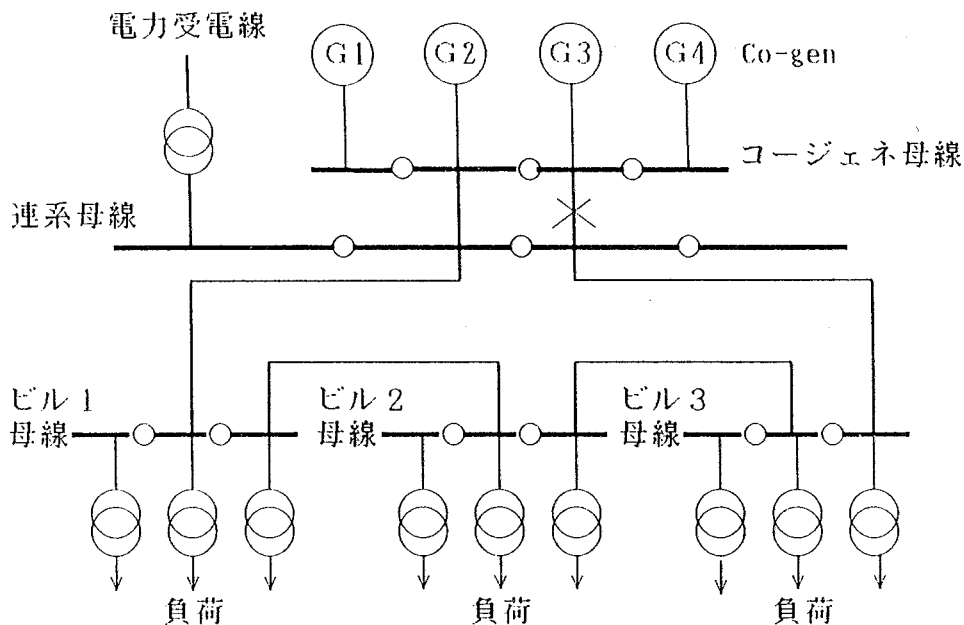


図8 ループ状系統

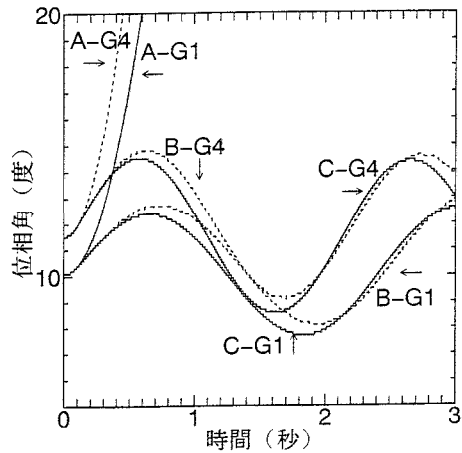


図9 ループ状システムの過渡安定度評価

2. 実行例

本システムは下記3つの配電システムについてそれぞれの発電機の安定度を評価し、結果は以下のようになる。

2.1 ループ状システム

図8のように、4機のコージェネレーションシステムの発電機は工場構内の3つの建物の負荷に電力を供給する。工場の電力はすべてこれらの発電機により供給

するが、供給信頼度を高めるために、電力会社の系統と連系して安定な給電を確保する。発電機G<sub>1</sub>~G<sub>3</sub>の定格出力は1500kW、発電機G<sub>4</sub>の出力は4500kWである。また、配電系ビル1、ビル2、ビル3の負荷はお互いにループの結線になる。

もし、コージェネ母線と連系母線間の配電線の1回線で地絡が発生する場合には、次の状況について評価する。なお、G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>の定格容量はG<sub>1</sub>と同じであるので、その位相角の動揺はG<sub>1</sub>と同じである。

ケースA:

故障回線がある時間以内に遮断しないと、4機の発電機はすべて脱調してします(図9のA線)。

ケースB:

故障回線を0.1秒後に遮断して、4機発電機の位相角は安定な状態に保たれる(図9のB線)。

ケースC:

故障回線は0.1秒後に遮断され、0.2秒後に故障が除去され、回線を再投入すると、4機発電機の位相角の動揺はさらに小さくなる。(図9のC線)

2.2 放射状システム

ループ状システムと同じように、配電系に4機の発電機と3つの負荷がある。しかし、負荷の結線は放射状になる(図10)。

この場合にもループ状システムの故障状況と同じように

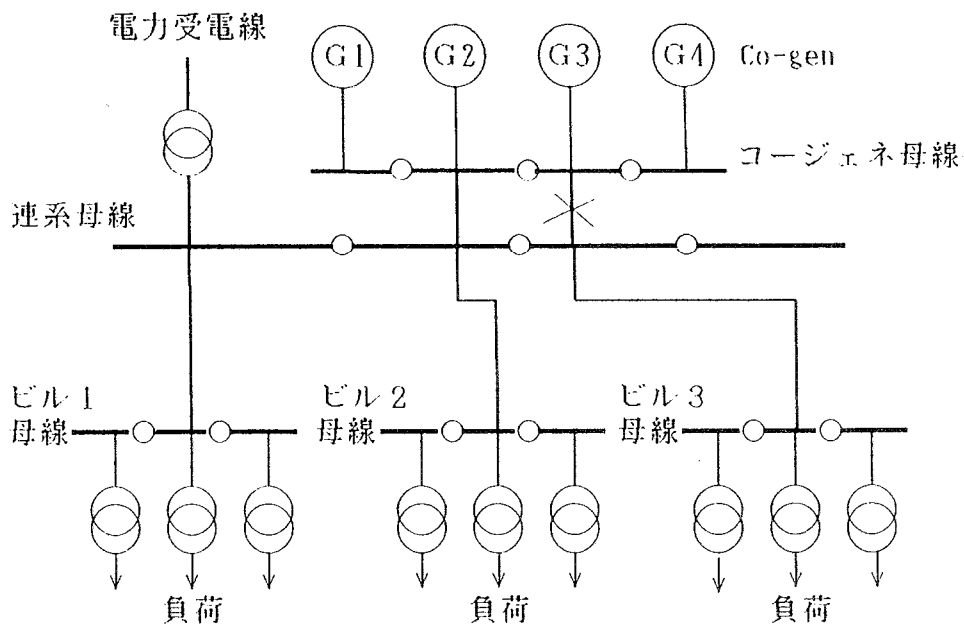


図10 放射状システム

コージェネ母線と連系母線間の配電線の1回線は地絡が発生することを想定して、それぞれケースA、ケースB、ケースCの順に位相角の動揺状況を模擬する。その結果は図11のようになる。

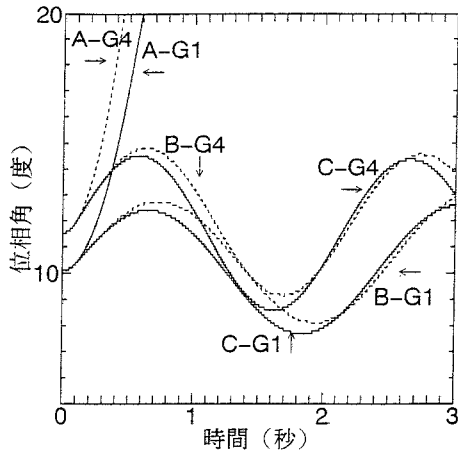


図11 放射状システムの過渡安定度評価

同じようにコージェネ母線と連系母線間の配電線の1回線に地絡が発生すると想定する場合には、次の3つのケースについて評価する。

ケースA：

故障回線がある時間以内に遮断しないと、4機の発電機はすべて脱調ない（図13のA線）。

ケースB：

故障回線を0.1秒後に遮断する場合には、4機発電機の位相角動揺はケースAより小さくなる（図13のB線）。

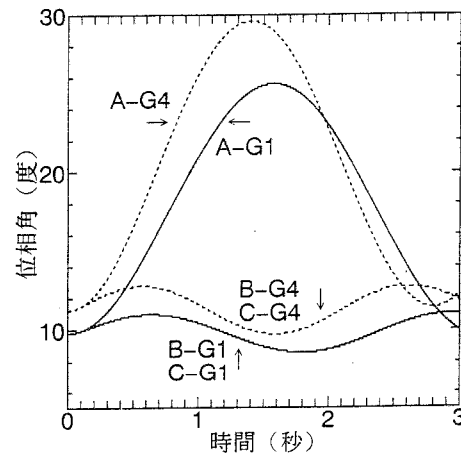


図13 電力線と連系の過渡安定度評価

3) 電力線はコージェネと並列する系統

図12の示すように電力受電線を連系母線からコージェネ母線に移す。ループ状系統と放射状系統の故障状

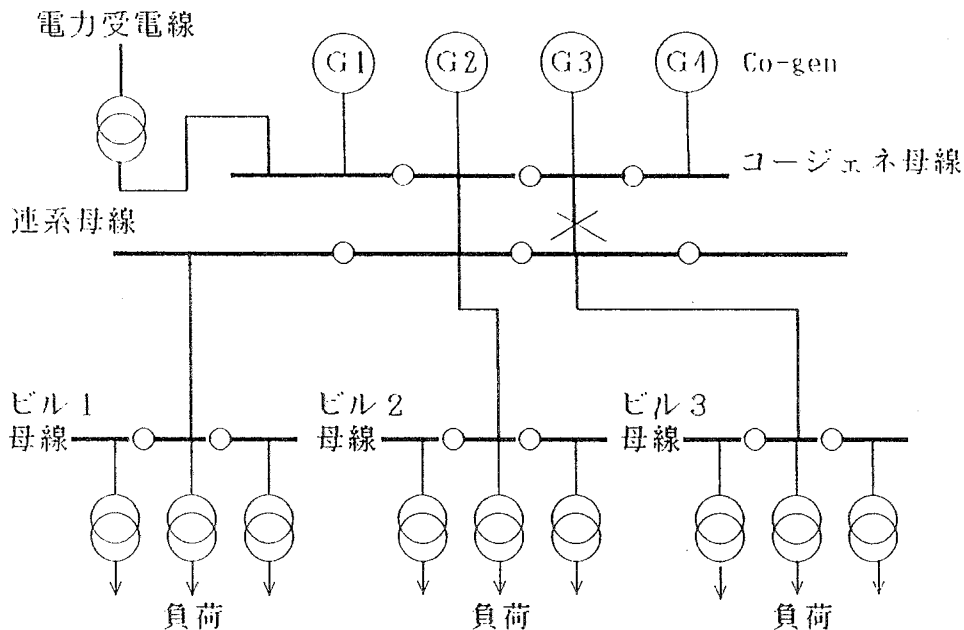


図12 受電線はコージェネ母線とつなぐ

ケースC：

故障回線は0.1秒後に遮断され、0.2秒後に故障が除去され、回線が再投入される場合には、4機発電機の位相角の動揺はケースBと同じである（図13のC線）。

### 3. シミュレーション結果の考察

2節に3つ配電システムの配電線故障時の発電機過渡安定度を評価したが、ここで、3つシステムの発電機位相角の動揺状況を評価する。まず、図14は故障回線が遮断しないときの動揺図、図15は故障回線が0.1秒後に遮断するときの動揺図、図16は故障回線が0.1秒後に遮断、0.2秒後に再投入されるときの動揺図である。また、A線はループ状系統、B線は放射状系統、C線は電力線とコージェネとを並列する系統の発電機G<sub>1</sub>の動揺線である。

図14～16の結果からみると、ループ状系統と放射状系統の発電機G<sub>1</sub>の動揺状況はまったく同じである（つまり、A線=B線）。これはコージェネ母線と連系母線間の配電線が故障になると、発電機位相角の動揺状況は負荷線の結線状況と関係がないということである。

また、A、B線に対し、C線の動揺角度は小さい。しかも、故障回線を遮断しなくても、C線の発電機は脱調にいたらない。これは配電線の故障によってもたらされる発電機の電氣的出力変動は電力会社受電線により吸収されるからである。以上の結果により、受電線とコージェネ母線と接続系統は地絡、短絡などの外乱に対する安定性が良いという結論を得る。

## VI 結論

教育訓練用電力系統過渡安定度解析システムの開発について述べた。ここで、開発したシステムの機能をまとめると次のようになる。

- (1)異なる系統および任意の故障箇所を計算対象としても、プログラム内容を変更する必要がなく、システムは自動的に発電機、負荷および系統構成を認識して過渡安定度を計算できる。
- (2)学習者是对話的の方式で故障箇所、計算の刻み、故障線の遮断時間と再投入時間、計算終了時間などのデータを変更できるので、需要に合わせて多様な評価結果を実行することができる。
- (3)V章の実行結果により、本システムを配電システムに導入して発電機の過渡安定度を評価すると、故障線の遮断なし、遮断および再投入状況に合わせて

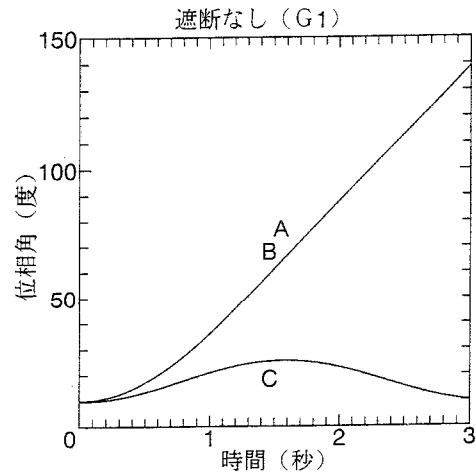


図14 遮断なしの動揺状況

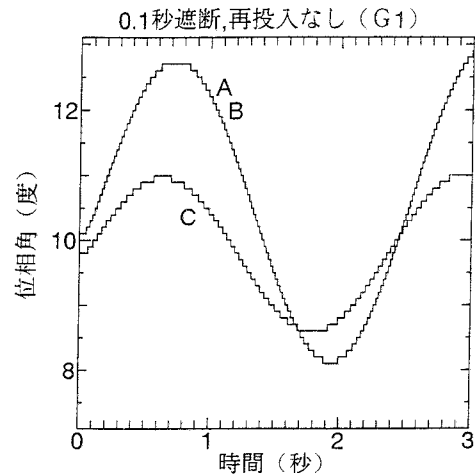


図15 0.1秒遮断の動揺状況

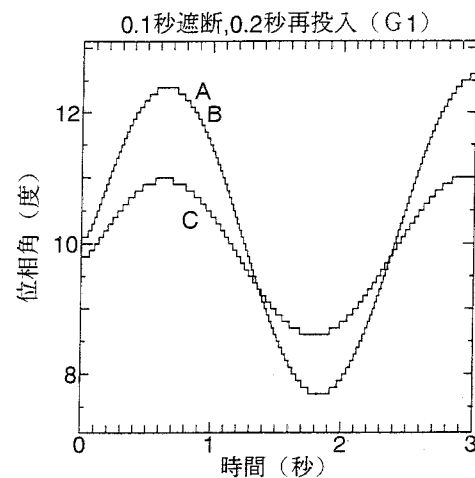


図16 0.1秒遮断,0.2秒再投入の動揺状況



正確に評価していることがわかる。

以上、本システムの導入により、学習者は需要により系統状態を多様に変化させて、その計算結果から安定度の理論を理解しやすい。このため、電力系統過渡安定度解析に関する学習に威力を発揮するものと考えられる。

#### 【参考文献】

- (1) 「コージェネレーションシステム」、電気学会技術報告（Ⅱ）第263号
- (2) 「電力系統の安定度」、電気協同研究第34巻第5号
- (3) 新田目：「電力系統技術計算の応用」、電気書院
- (4) 林、他：「配電系統における発電機の過渡安定度評価の自動化」、1995年大阪職業能力開発短期大学校研究発表会