



Title	沖縄本島における電力系統の過渡安定度解析
Author(s)	宮城, 隼夫; 安里, 貞夫
Citation	琉球大学工学部紀要(26): 75-87
Issue Date	1983-09
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/5588
Rights	

沖繩本島における電力系統の過渡安定度解析

宮城隼夫* 安里貞夫**

Transient Stability Analysis of Power System on the Okinawa Island

Hayao MIYAGI, Sadao ASATO

The transient stability of a practical power system on the Okinawa island is studied. The system includes a coal-thermal power station whose commercial operation is scheduled for 1987. In order to investigate the transient stability of this new system, a symmetrical three phase fault is assumed on the main line. The basic feature of the system is studied for varying fault point on the line.

key Words: Okinawa island, Power system, Transient stability

1 まえがき

多数の同期発電機が系統網を介して同期運転している電力系統に突発的な負荷変動や地絡、短絡などの故障が発生した場合、各発電機間で同期を保ちえないいわゆる脱調の状態に至ることがある。このような突発的擾乱に対する過渡安定極限電力は定態安定極限電力より小さいのが普通であり、擾乱に対して無停電送電を行うには平常の送電電力を過渡安定極限電力以下に制限しなければならない。したがって、莫大な費用を投資して建設された系統設備を有効に利用するためにはこの過渡安定極限電力を可能な限り定態安定極限電力に近づける必要があり、従来から過渡安定度の向上には多大な努力が払われてきた。近年における故障回線の高速しゃ断方式や高速再閉路方式などの高度な技

術は系統の過渡安定度をかなり向上させている。系統運用計画に際し過渡安定度の把握が必要不可欠であることはいうまでもないが、発電所や変電所の増設などの系統拡充計画においてもその経済的効率はもちろんのこと設備の増設が系統の安定度に及ぼす影響についても十分検討しておかなければならない。沖繩本島は細長い島という地理的条件と電力需要が那覇市から沖繩市あたりにかけて集中しているところから、全島的に停電の無い質の良い電気を供給するには過渡安定度の立場からの系統計画も重要になってくると思われる。特に台風銀座であり過渡擾乱の発生しやすい沖繩においては系統の効率的運用のためにも過渡安定度の解析が必要になってくる。

現在、沖繩本島内には5箇所の発電所があり、主力の牧港発電所が系統火力並びに那覇一帯の都市火力発

受付：1983年4月30日

*琉球大学工学部電子・情報工学科

**電源開発株式会社火力部火力建設課

電所の役目を担っているが、昭和62年には石川に150〔MW〕級の石炭火力発電所が増設される計画になっており、その後はこの両発電所が系統全体に電力を供給する系統火力発電所の役目をするものと思われる。そこで本資料においては、この昭和62年の新系統を対象に過渡安定度解析を行い、安定度の立場からの新系統の性質を調べる。すなわち132〔KV〕送電を行っている基幹幹線上に苛酷な故障である三相短絡事故を想定し、故障発生による各発電機の振舞いについて調べるとともに、系統の予防制御のための一資料を提供するものである。

2. 発電機の動特性式

2-1. 動特性式

図1に示すようにN台の同期発電機が並列運転している電力系統において、発電機の動特性式は次式で表わされる。

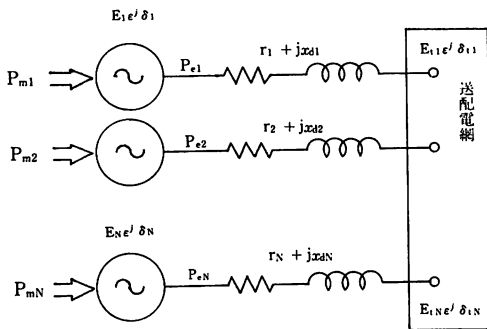


Fig.1 Power system

$$\frac{M_1}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N) \tag{1}$$

$$\frac{M_2}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N)$$

.....

$$\frac{M_N}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_N}{dt^2} = P_{mN} - P_{eN}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N)$$

ただし、制動項は無視しており

$$P_{ej} = \sum_{k=1}^N E_j E_k Y_{jk} \cos(\delta_{jk} - \theta_{jk}) \tag{2}$$

である。なお本資料で使用される諸記号については表1に示した。

Table 1 List of symbols

r	: 発電機電機子抵抗
X_d	: 過渡リアクタンス
$Y \angle \theta$: アドミタンスの大きさとその角度
$E \angle \delta$: 過渡リアクタンス背後電圧の大きさとその位相角
M	: 発電機単位慣性定数
P_m	: 発電機機械的入力
P_e	: 発電機電氣的出力
$E_t \angle \delta_t$: 発電機端子電圧の大きさとその位相角
$\omega_0 = 2\pi f_0$	($f_0 = 60\text{Hz}$)
$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, $\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j$

またN機の発電機群の中からj番目の発電機を基準に選び、(1)式を相差角とその角速度を変数とする式に書き改めると次式ようになる。

$$\frac{d\delta_{1j}}{dt} = \omega_{1j}$$

$$\frac{d\delta_{2j}}{dt} = \omega_{2j}$$

.....

$$\frac{d\delta_{N-1,j}}{dt} = \omega_{N-1,j} \tag{3}$$

$$\frac{d\omega_{1j}}{dt} = \frac{\omega_0}{M_1} (P_{m1} - P_{e1}) - \frac{\omega_0}{M_j} (P_{mj} - P_{ej})$$

$$\frac{d\omega_{2j}}{dt} = \frac{\omega_0}{M_2} (P_{m2} - P_{e2}) - \frac{\omega_0}{M_j} (P_{mj} - P_{ej})$$

.....

$$\frac{d\omega_{N-1,j}}{dt} = \frac{\omega_0}{M_{N-1}} (P_{m(N-1)} - P_{e(N-1)}) - \frac{\omega_0}{M_j} (P_{mj} - P_{ej})$$

2-2. 発電機の集約化

本資料においては昭和62年度の新系統を対象とするので、系統内の発電所は牧港と石川の両発電所のみ運転するものとする。さらにそれぞれの発電所の発電機群を大きく2つに分け、系統全体としては等価的に4

機の発電機が電力を供給するものとみなす。

同一グループに属する発電機群を一台の等価発電機として集約する方法はこれまでに数多く提案されているが、ここでは「並列インピーダンスを等価とする方法」を用いる。この方法では図2に示すような集約化において次式が成立する。

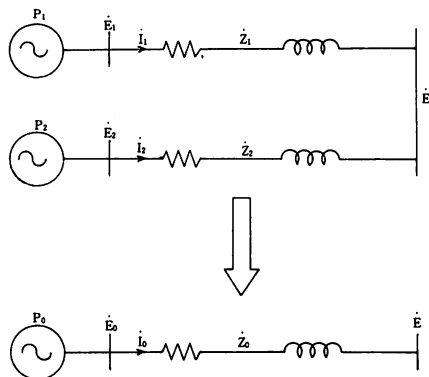


Fig.2 Reduction of generators

$$\begin{aligned}
 P_0 &= P_1 + P_2, \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \\
 \dot{Z} &= \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)} \\
 E_0 &= \dot{E} + \dot{Z}_0 \dot{I}_0 = \frac{\dot{Z}_2 \dot{E}_1 + \dot{Z}_1 \dot{E}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}
 \end{aligned} \tag{4}$$

なおこの場合、グループ内各端子の力率はほぼ等しく電力は電流に比例するものとしている。

2-3. 浮遊ノードの除去

系統内においてノードの全個数を n 、発電機端ノードの個数を N 、除去すべき浮遊ノードの個数を l とする。ノード $1 \sim N$ までを発電機ノード、ノード $N+1 \sim n$ までを浮遊ノードに番号付けをすれば、各ノードにおける電流と電圧の関係式は

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_N \\ \dot{I}_{N+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \cdots & \dot{Y}_{1N} & \dot{Y}_{1,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{1n} \\ \dot{Y}_{21} & \cdots & \dot{Y}_{2N} & \dot{Y}_{2,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Y}_{N1} & \cdots & \dot{Y}_{NN} & \dot{Y}_{N,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{Nn} \\ \dot{Y}_{N+1,1} & \cdots & \dot{Y}_{N+1,N} & \dot{Y}_{N+1,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{N+1,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \cdots & \dot{Y}_{nN} & \dot{Y}_{n,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ \vdots \\ \dot{E}_N \\ \dot{E}_{N+1} \\ \vdots \\ \dot{E}_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

ここで

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{N+1} &= 0 \\
 \dot{I}_{N+2} &= 0 \\
 &\vdots \\
 \dot{I}_n &= 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

が成立するので(5), (6)式より

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{N+1,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{N+1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{Y}_{n,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{N+1} \\ \vdots \\ \dot{E}_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{Y}_{N+1,1} & \cdots & \dot{Y}_{N+1,N} \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \cdots & \dot{Y}_{nN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \vdots \\ \dot{E}_N \end{bmatrix} \tag{7}$$

なる関係が得られる。(7)式より $E_{N+1} \sim E_n$ を求めると

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{E}_{N+1} \\ \vdots \\ \dot{E}_n \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} \dot{Y}_{N+1,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{N+1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{Y}_{n,N+1} & \cdots & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{Y}_{N+1,1} & \cdots & \dot{Y}_{N+1,N} \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{Y}_{n1} & \cdots & \dot{Y}_{nN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \vdots \\ \dot{E}_N \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 & \cdots & \dot{\eta}_N \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{\eta}_1 & \cdots & \dot{\eta}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \vdots \\ \dot{E}_N \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{8}$$

(8)式を(5)式の $E_{N+1} \sim E_n$ に代入すれば

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} + (\dot{Y}_{1,N+1} \dot{\eta}_{11} + \dots + \dot{Y}_{1n} \dot{\eta}_{11}), & \dots \\ \vdots & \vdots \\ \dots, \dot{Y}_{1N} + (\dot{Y}_{1,N+1} \dot{\eta}_{1N} + \dots + \dot{Y}_{1n} \dot{\eta}_{1N}) & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \dots, \dot{Y}_{NN} + (\dot{Y}_{N,N+1} \dot{\eta}_{1N} + \dots + \dot{Y}_{N1} \dot{\eta}_{1N}) & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \vdots \\ \dot{E}_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

となり発電機端ノードのみの電流、電圧の関係が得られる。

3. 沖縄本島の送電系統

3-1. 発電所

図3に示すように、現在沖縄本島内には南から城間、牧港、北谷、石川、金武の5箇所に発電所があるが、本資料では昭和62年に石川石炭火力発電所が建設され

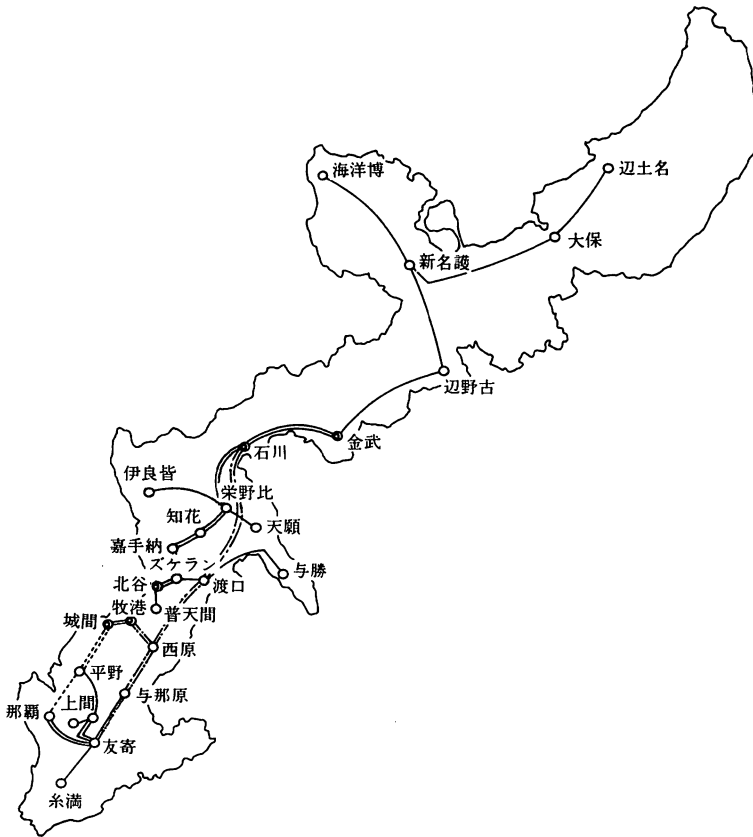


Fig. 3 Power system on the Okinawa island

た後は牧港と石川の両発電所で本島内の全需要をまかなうものとするので、城間、北谷、金武の各発電所は停止状態にする。したがって、ここでは牧港発電所、

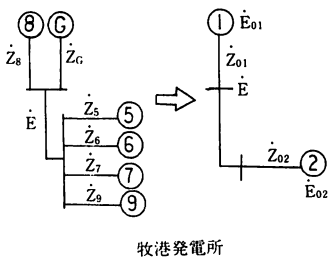
石川発電所の発電機群をそれぞれ等価2機に集約し、系統全体としては等価的に4機の発電機を有するものとして取り扱う。原系統の個々の発電機のデータは表

Table2 Generator constants

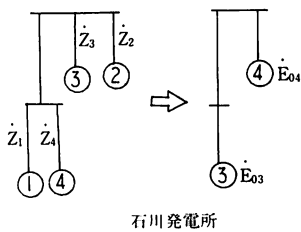
発電所名	発電機番号	容量		力率 %	端子電圧, K V	単位慣性定数, S	過渡リアクタンス, %
		M V A	M W				
牧港	5	100	85	85	13.8	2.84	22.32
	6	100	85	85	13.8	2.84	21.94
	7	100	85	85	13.8	2.95	28.71
	8	100	85	85	13.8	2.84	22.32
	9	147	125	85	13.8	3.52	22.0
牧港G/T	1	71	55	85	13.8	4.73	11.93
石川	1	147	125	85	13.8	2.84	25.50
	2	147	125	85	13.8	2.80	23.50
	3	192	156	85	13.8	6.8	11.98
	4	192	156	85	13.8	6.8	11.98

(リアクタンス：190 M V A 基準)

2に記述した。図4は発電機の集約手順を明示したもので、インピーダンスや電圧の具体的な数値については表3に示した。なお、等価単位慣性定数Mについては文献〔4〕に従い各発電機の単位慣性定数の和を用いる。



牧港発電所



石川発電所

Fig. 4 Coherent group of generators

3-2. 系統のインピーダンスマップ

図5に昭和62年度の新系統のインピーダンスマップを示した。現在の系統に増設される分についてはその計画値を採用している。数値は、基準電力を100〔M V A〕に、基準電圧を132〔K V〕に選んだ場合のパーユニット値で表わされている。また、負荷は全て定インピーダンス負荷として取り扱い、線路の対地容量については無視した。図においてノード1～4が等価発電機としての電源ノードで、残りのノードは浮遊ノードであり、2-3で述べた手法に従い除去される。

3-3. 故障及び故障地点の設定

系統の過渡安定度を調べるには苛酷な故障に対して解析しておけば十分であるので、本資料では三相短絡故障を主幹線を中心とした幹線上に想定する。故障地点は10箇所、図5のインピーダンスマップ上にA～Jの記号で示した。故障地点と幹線の関係は表4に示している。

Table3 Reductron of generator numbers

	原 系 統	集 約 化 さ れ た 系 統
No. 1 (牧港)	$\dot{Z}_8 = j 0.2745$ $\dot{Z}_G = j 0.3035$ $\dot{E} = 0.9952 - j 0.0238$ $\dot{W} = P_0 + jQ_0$ $= 0.779 + j 0.370$	$\dot{Z}_{01} = j 0.1441$ $\dot{E}_{01} = 1.0554 \angle 0.0859$
No. 2 (牧港)	$\dot{Z}_5 = j 0.2694$ $\dot{Z}_6 = j 0.2717$ $\dot{Z}_7 = j 0.3333$ $\dot{Z}_9 = j 0.2016$ $\dot{E} = 0.9970$ $P_0 + jQ_0 = 1.632 + j 0.760$	$\dot{Z}_{02} = j 0.0651$ $\dot{E}_{02} = 1.0520 \angle 0.1015$
No. 3 (石川)	$\dot{Z}_1 = j 0.1542$ $\dot{Z}_4 = j 0.2076$ $\dot{E} = 1.0458 + j 0.0938$ $P_0 + jQ_0 = 2.570 + j 1.230$	$\dot{Z}_{03} = j 0.0885$ $\dot{E}_{03} = 1.1738 \angle 0.2757$
No. 4 (石川)	$\dot{Z}_2 = j 0.1542$ $\dot{Z}_3 = j 0.2088$ $\dot{E} = 1.0254 + j 0.0999$ $P_0 + jQ_0 = 2.470 + j 0.371$	$\dot{Z}_{04} = j 0.0887$ $\dot{E}_{04} = 1.1137 \angle 0.2892$

(単位：パーユニット値，角度：度)

Table4 Three-phase fault of the various points

故障地点	幹 線 名	送電線恒長との関係
A	○西原幹線 (牧港-西原)	線路の中央
B	○西原幹線	牧港より 1/10の地点
C	○渡口幹線 (西原-渡口)	線路の中央
D	○中頭幹線 (渡口-石川)	石川より 1/10の地点
E	○中頭幹線	線路の中央
F	○西友幹線 (西原-友寄)	線路の中央
G	北中幹線 (渡口-瑞ヶ覧)	線路の中央
H	平野幹線 (平野-勢理客)	平野-勢理客間の 線路の中央
I	本部幹線 (新名護-海洋博)	今帰仁-海洋博間の 線路の中央
J	牧港発電所	所 内

(○印：主幹線)

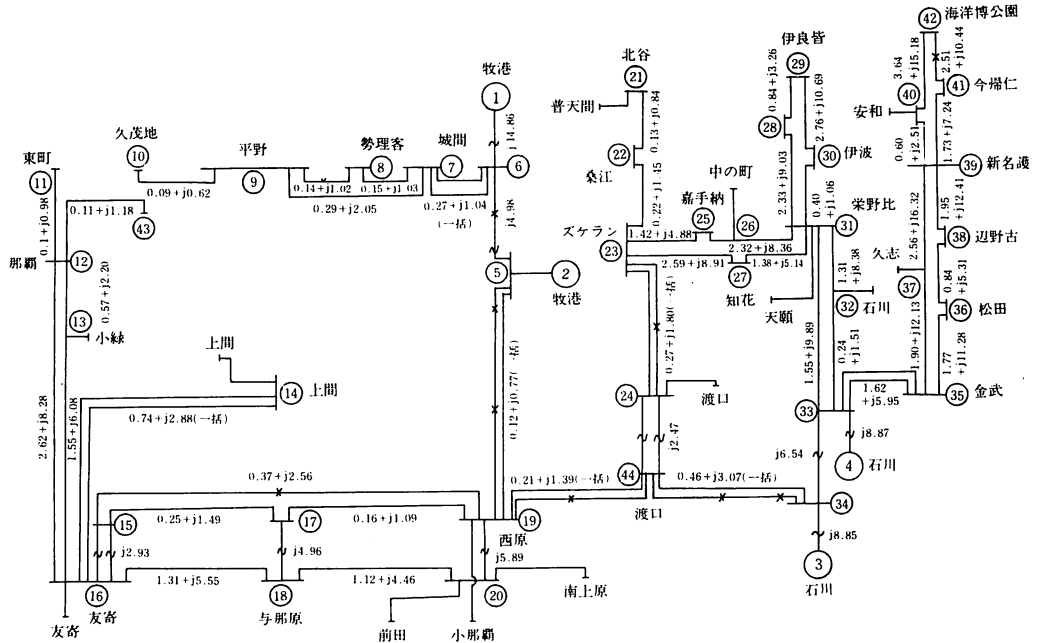


Fig. 5 Impedance map

4. 過渡安定度計算結果と検討

図6~15は故障点A~Jに対する各発電機の動揺曲線である。図6~12は0.1秒後に故障発生、さらに0.1秒後に故障回線をしゃ断した場合と故障発生のまま放置した場合の両曲線を描いている。図13, 14は、故障回線をしゃ断しなくても発電機が脱調しない例であり、図15は牧港発電所の所内で三相短絡故障が発生したときの動揺曲線である。図の縦軸は全て牧港No.2発電機を基準とした相差角を示している。全体的に見ると、主幹線上で発生した故障は発電機の動揺の振幅を大きくすることがわかる。また図6と図7を比較してみると、故障地点が牧港側に近づくほど牧港No.1発電機の動揺の振幅は大きくなるが、逆に石川のNo.3, No.4発電機は振幅が小さくなっている。この故障地点に近い発電機ほど大きく振動するという傾向は他の例でもわかる。例えば図13は平野幹線の平野-勢理客間線路の中央である安謝付近で三相短絡故障が発生したときの各発電機の動きであるが、この例では牧港No.1発電機は基準発電機に対して比較的大きく動揺しているものの石川No.3, No.4発電機は故障回線を除去しなくても動揺の程度はごく小さくゆる

やかである。これは、平野-勢理客間の電力潮流が小さいことと、城間から平野へ直接結ばれている線路があるので、故障中에서도極端に送電電力が減らないためと考えられる。さらに、各発電機から最も遠い故障地点である今帰仁-海洋博公園間線路上の故障に対しては、故障回線をしゃ断しなくても各発電機に与える影響が少ないことが図14よりわかる。

故障地点の中で最も発電機に悪影響を与えるのは、中頭幹線上の石川から線路恒長の10分の1の地点、すなわち石川発電所に最も近い故障地点である。図9から明らかのように、事故発生後0.1秒で故障回線をしゃ断しても石川No.3機の相差角 δ_{32} は 40° 近くまで振動する。系統の心臓部分に近いという点でもうなずけるが、このような地点の送電線には事故に対する十分な配慮が必要であろう。

以上の結果から沖縄本島の電力系統の過渡安定度に対する総合的な検討を行ってみると比較的送電電力が小さい送電線上での故障は系統全体に及ぼす影響が小さく安定度の面で問題は少ない。しかしながら故障地点が132〔KV〕送電を行っている主幹線上である場合、系統全体に及ぼす影響はかなり大きくなる。主幹線のほとんどが二回線になっているので、安定度

対策としてはかなりの効果を持っているものと思われるが、そこでの故障は系統全体に与える影響が大きい

ので、命綱ともなるしゃ断器の保守はもちろんのこと、さらなる安定度向上対策への配慮が必要であろう。

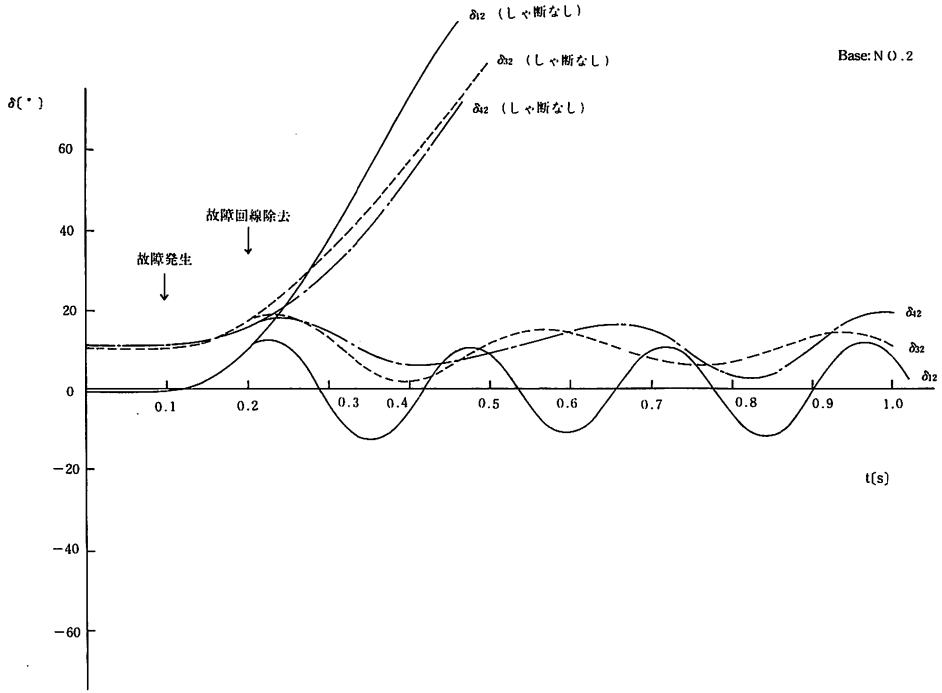


Fig 6 Swing curves (MAK05 - NIS19)

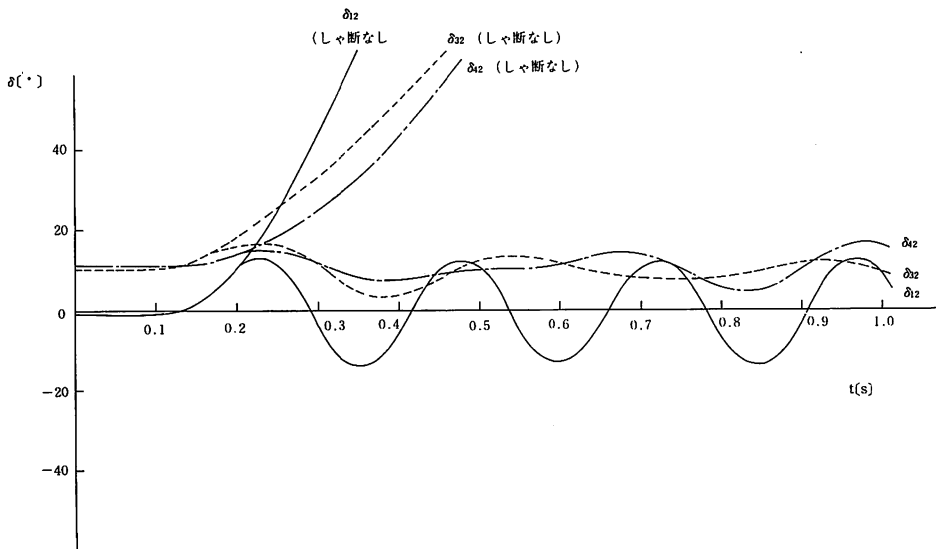


Fig. 7 Swing curves (MAK05 - NIS19 1:9)

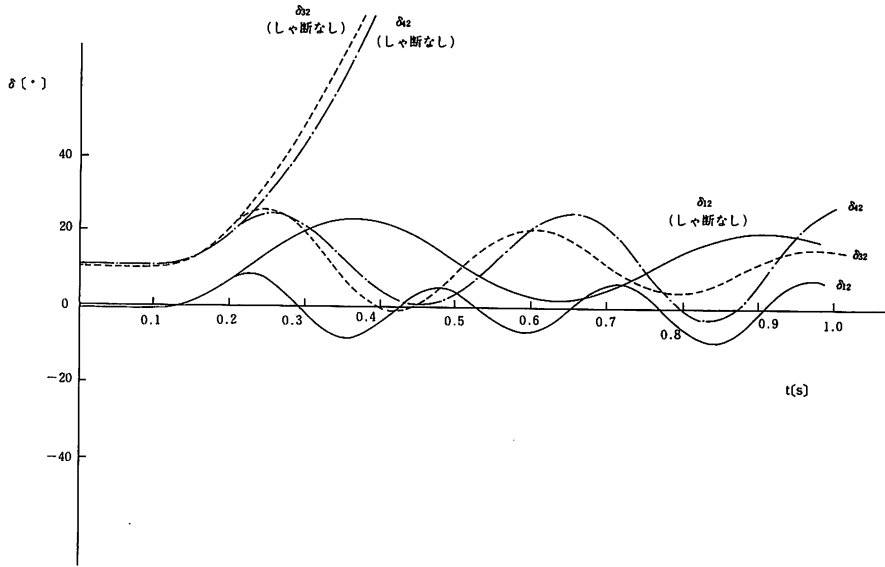


Fig. 8 Swing curves (NIS19-TOG44)

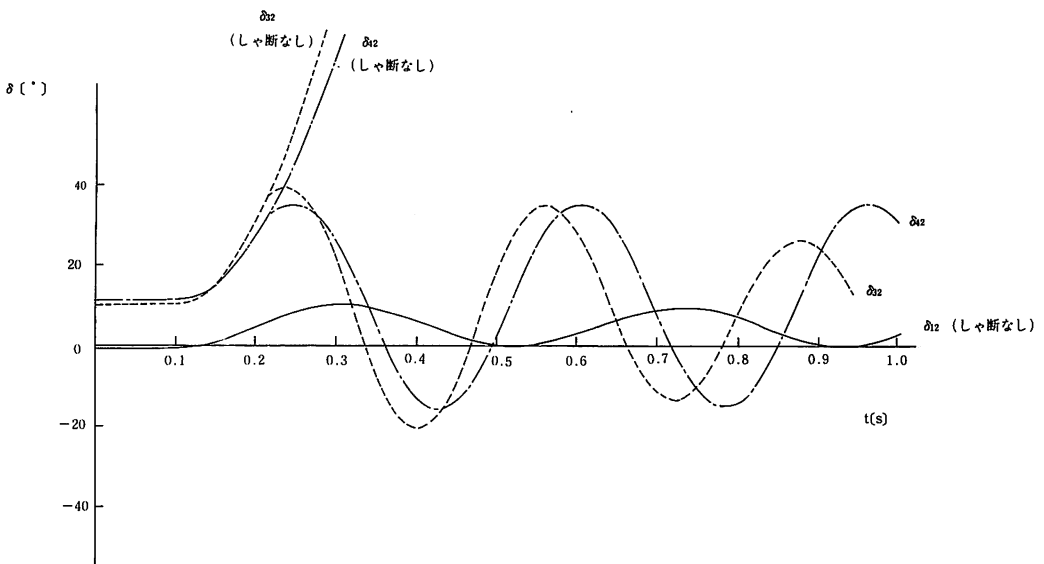


Fig. 9 Swing curves (TOG44-ISH34 9:1)

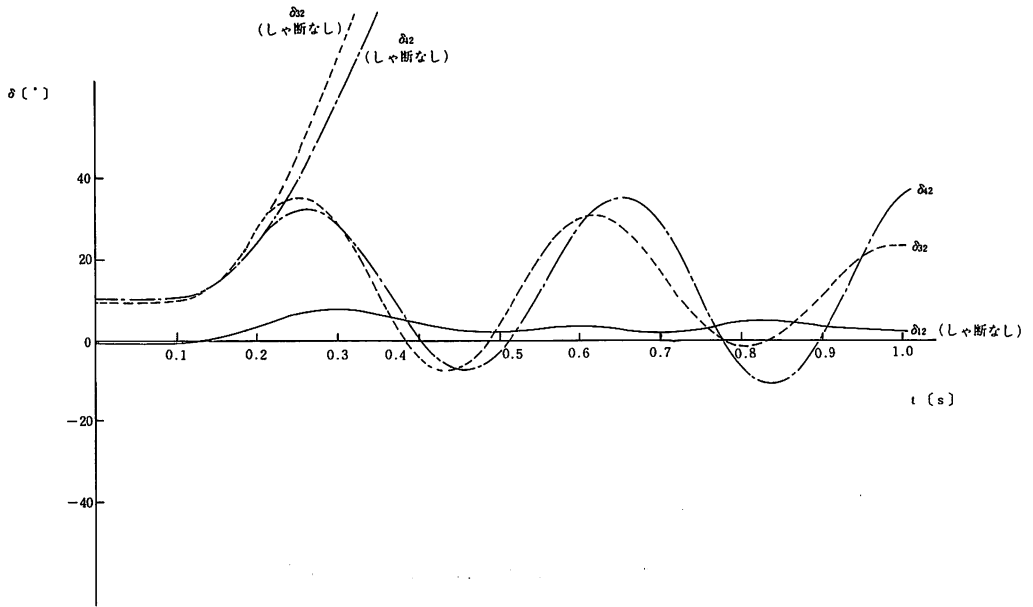


Fig. 10 Swing curves (TOG44 - ISH34)

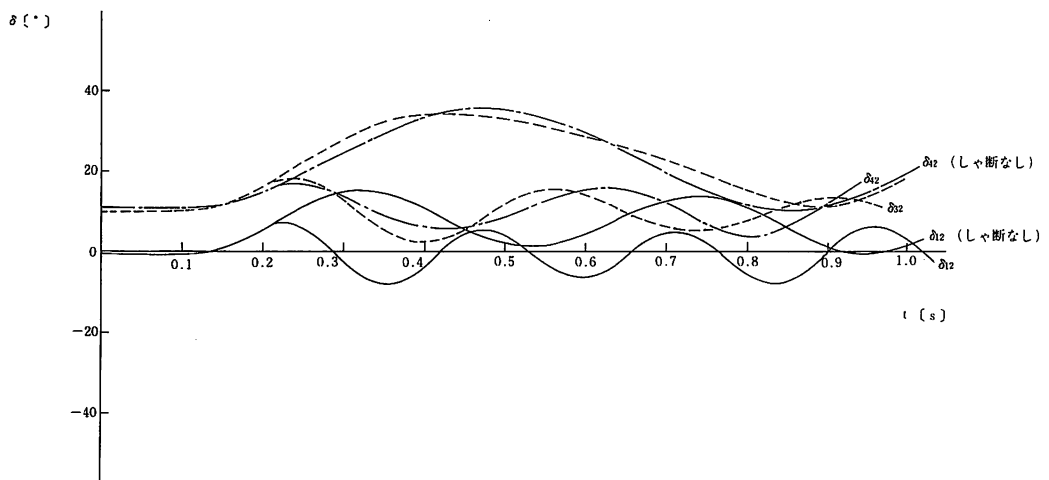


Fig. 11 Swing curves (TOM15 - NIS19)

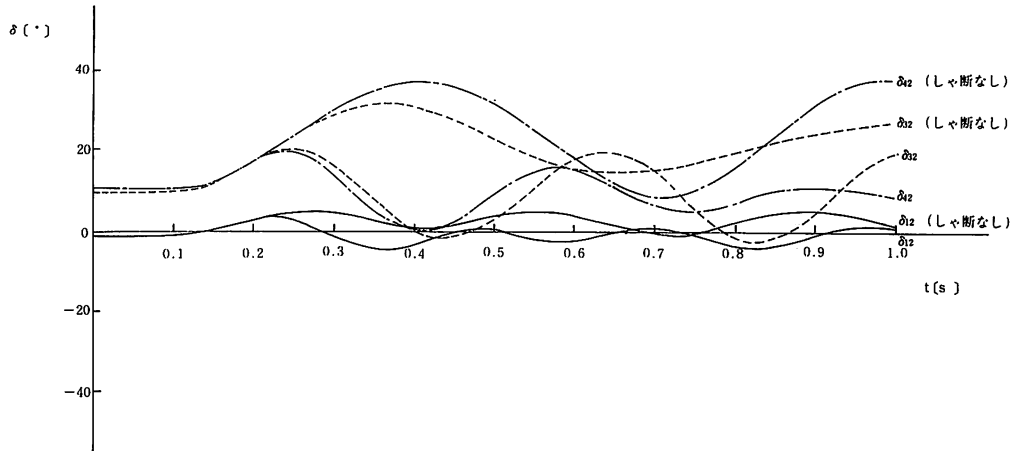


Fig. 12 Swing curves (TOG24 - ZUK23)

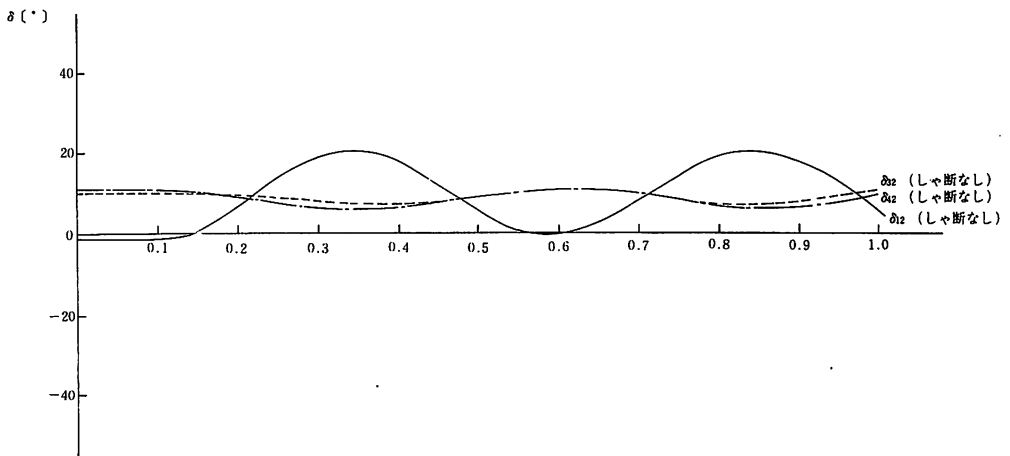


Fig. 13 Swing curves (HIR09 - SER08)

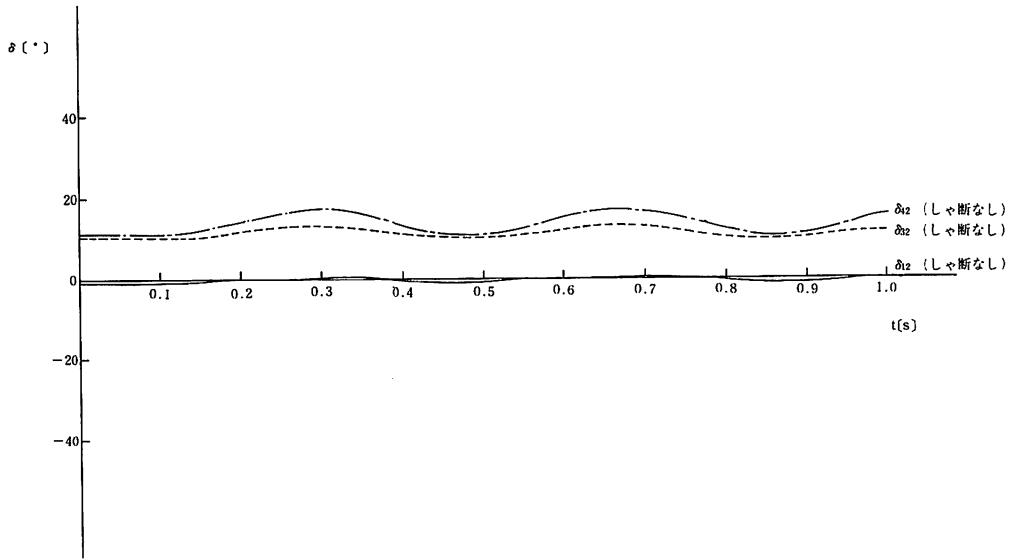


Fig. 14 Swing curves (NAK41 - EXP)

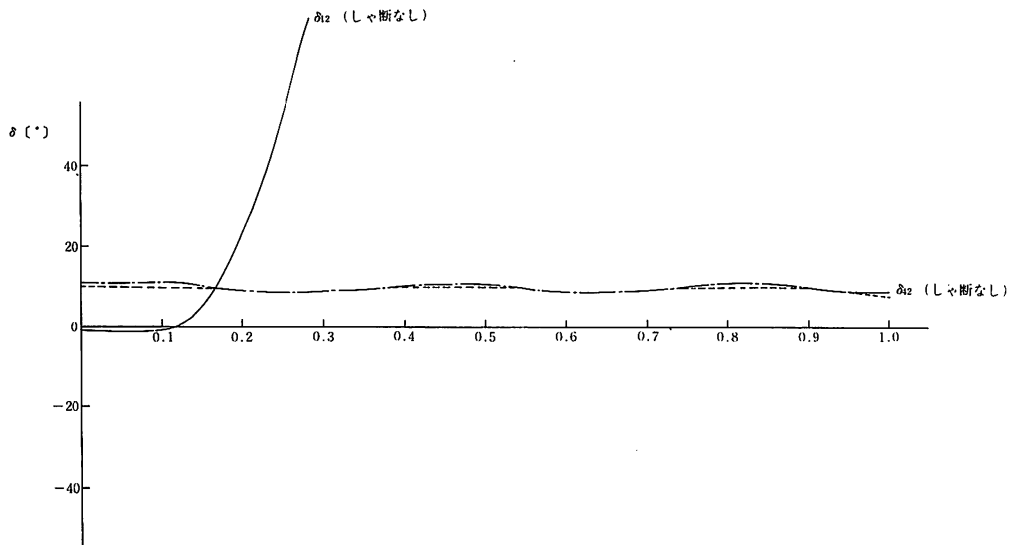


Fig. 15 Swing curves (MAK05 - MAK06)

5. あとがき

本資料においては、沖縄電力株式会社から系統のデータや潮流計算結果の提供をうけ、それに基づいて系統の過渡安定度解析を行った。今後、牧港発電所と石川発電所の最適な電力供給比率についても検討したいと考えている。

謝 辞

数々の資料を提供して下さり、絶大なる御協力をいただいた沖縄電力工務課課長豊川勲氏ならびに富島喜順氏に心から感謝致します。また本資料作成にあた

り御協力をいただいた本学電気工学科学生、渡嘉敷睦男君に謝意を表わします。

文 献

- 〔1〕 関根泰次他著, 「電力系統工学」 コロナ社 (1979)
- 〔2〕 林 泉著, 「電力系統」 昭見堂 (1976)
- 〔3〕 武藤三郎 他 著, 「送配電工学」 朝倉書店 (1976)
- 〔4〕 大沢他, 「リアアノフ関数にもとづく電力系統の過渡安定度解析のための等価簡略化法」, 昭和53年電気学会全国大会, P. 1006