

離島系統の電力動揺問題について

高田 等・八野 知博・宮下喜三夫

(受理 平成 8 年 5 月 30 日)

On the problem of oscillations in a solitary island power system

Hitoshi TAKATA, Tomohiro HACHINO and Kimio MIYASHITA

Improvements of stability and reliability in power systems have been a very important problem. The power system in solitary islands such as Tanegashima have special characteristics, e.g. a diesel engine and capacitive load. In order to analyze such a system, one needs theoretical study and detail simulations for a model represented by a power system, generating plants and control elements.

In this paper, by using a power system simulator we investigate power oscillations of Tanegashima power system through some theoretical analyses and simulations.

1 まえがき

近年、電力系統の安定運用、ならびに信頼度向上に対する要請が一段と強くなってきている。例えば、種子島などの離島系統においては、それぞれ離島ごとの独立した系統となっており、しかもディーゼル機関で負荷や運用に特殊性がある。このため系統事故時の操作に対しては、比較的長時間に亘って現象を精度よく解析し、電力系統の全安定度および発電プラントの安定運転の可否を判断する必要がある。このような目的の解析を行うためには、電力系統、発電機、および発電ユニットの制御装置のモデル表現を基に、理論的解析および詳細なシミュレーション実験を行わなければならない¹⁾。

本稿では、種子島電力系統を具体的に選び、その理論的解析とシミュレーション実験を行った。特に早朝の軽負荷時において、種子島第一発電所10号機と11号機および新種子島発電所2号機を並列運転した場合、発電機の運転が進み力率となり、電力動揺が発生し易い状況となる。この場合の実験データ結果は、実データを良く模擬した。

2 理論的解析

2.1 同期機間合成共振周波数

図1は電力動揺発生時の種子島電力系統である。この時の合成共振周波数を求めるための計算式を導出しよう。

2機系統の動揺方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{M_1}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + \frac{D_1}{\omega_0} \frac{d\delta_1}{dt} + P_{E1} &= P_{j1} \\ \frac{M_2}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + \frac{D_2}{\omega_0} \frac{d\delta_2}{dt} + P_{E2} &= P_{j2} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 P_{j1} , P_{j2} は発電機の機械的入力、 P_{E1} , P_{E2} は発電機の電氣的出力である。ここで、共振周波数のみを計算するため、制動トルク、ガバナ、AVRなどを無視すれば、(1)式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{M_1} (P_{j1} - P_{E1}) \\ \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{M_2} (P_{j2} - P_{E2}). \end{aligned} \quad (2)$$

図2より、

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_s \\ \dot{I}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & -\dot{Y}_{12} \\ -\dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_s \\ \dot{V}_r \end{bmatrix}. \quad (3)$$

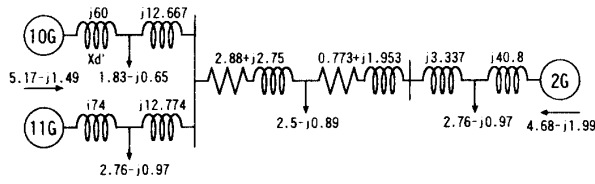


図1 種子島電力系統

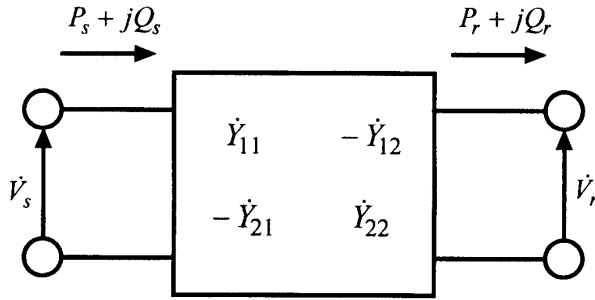


図2 Y行列表示4端子回路

ここで、 $\delta = \delta_1 - \delta_2$, $\dot{V}_r = V_r$, $\dot{V}_s = V_s e^{j\delta}$, $\alpha_{ij} = \pi/2 - \theta_{ij}$ とすると

$$P_s = V_s^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + V_s V_r Y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) \quad (4)$$

$$P_r = V_r^2 Y_{22} \sin \alpha_{22} + V_s V_r Y_{21} \sin(\delta - \alpha_{21})。$$

(2)式において $P_{E1} = P_s$, $P_{E2} = -P_r$ とおけば、

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{M_1} (P_{j1} - P_s) \\ \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= \frac{\omega_0}{M_2} (P_{j2} + P_r) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。(5)式より

$$\left(\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} \right) = \frac{\omega_0}{M_1} (P_{j1} - P_s) - \frac{\omega_0}{M_2} (P_{j2} + P_r)。 \quad (6)$$

なので $\delta = \delta_1 - \delta_2$ とおけば、

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{\omega_0}{M_1} P_s + \frac{\omega_0}{M_2} P_r = \frac{\omega_0}{M_1} P_{j1} - \frac{\omega_0}{M_2} P_{j2}。 \quad (7)$$

となる。(7)式で定常値を θ_0 , P_{s0} , P_{r0} , P_{j10} , P_{j20} , 変化分を $\Delta\theta$, ΔP_s , ΔP_r とする。ただし機械的入力に変化しないと仮定すると

$$\begin{aligned} \frac{d^2 (\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2} + \frac{\omega_0}{M_1} (P_{s0} + \Delta P_s) + \frac{\omega_0}{M_2} (P_{r0} + \Delta P_r) \\ = \frac{\omega_0}{M_1} P_{j10} - \frac{\omega_0}{M_2} P_{j20} \end{aligned} \quad (8)$$

故に

$$\frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{\omega_0}{M_1} \Delta P_s + \frac{\omega_0}{M_2} \Delta P_r = 0。 \quad (9)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= \frac{dP_s}{d\delta} \Delta\delta \\ \Delta P_r &= \frac{dP_r}{d\delta} \Delta\delta \end{aligned} \quad (10)$$

より(9)式は

$$\frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{\omega_0}{M_1} \frac{dP_s}{d\delta} \Delta\delta + \frac{\omega_0}{M_2} \frac{dP_r}{d\delta} \Delta\delta = 0 \quad (11)$$

となる。(4)式より

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{d\delta} &= V_s V_r Y_{12} \cos(\delta - \alpha_{12}) \\ \frac{dP_r}{d\delta} &= V_s V_r Y_{21} \cos(\delta - \alpha_{21}) \end{aligned} \quad (12)$$

なので δ の動きが小さいものとして $\delta \cong 0$ とおくと

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{d\delta} &= V_s V_r Y_{12} \cos \alpha_{12} \\ \frac{dP_r}{d\delta} &= V_s V_r Y_{21} \cos \alpha_{21} \end{aligned} \quad (13)$$

を得る。(13)式を(11)式に代入して

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{\omega_0}{M_1} (V_s V_r Y_{12} \cos \alpha_{12}) \Delta\delta \\ + \frac{\omega_0}{M_2} (V_s V_r Y_{21} \cos \alpha_{21}) \Delta\delta = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

である。 $Y_{12} = Y_{21}$, $\alpha_{12} = \alpha_{21}$ より

$$\frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{\omega_0 (M_1 + M_2)}{M_1 M_2} (V_s V_r Y_{12} \cos \alpha_{12}) \Delta\delta = 0 \quad (15)$$

となる。よって

$$K = \frac{\omega_0 (M_1 + M_2)}{M_1 M_2} (V_s V_r Y_{12} \cos \alpha_{12}) \quad (16)$$

とおくと、合成共振周波数(臨界周波数)が

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K} \quad [\text{Hz}] \quad (17)$$

となる。これにより、合成共振周波数を求めるための式が導出された。

次に、図1の種子島電力系統における合成共振周波数および周期を計算する。(17)式は2機系統の場合の式であるから図1の系統において、種子島第10号機および11号機に関する縮約を行うと図3のようになる。ここで、発電機内部誘起電圧および発電機相角は中種子を基準 ($1 \angle 0$) として次式より求めた。なお送電線における電圧降下は微小であるため無視した。

表1 ディーゼルエンジンの脈動トルク

発電機	回転数 (rpm)	気筒数 C	脈動周波数成分 [Hz]					
			$j=16$		$j=14$		$j=12$	$j=1$
2号	514	16	68.5	...	60	...	51.4	...
10号, 11号	400	16	53.3	...	46.6	...	40	...

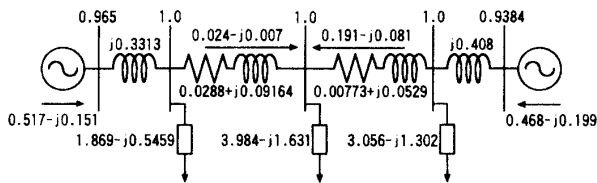


図3 縮約系統

$$\begin{cases} P_r = bV_r V_s \sin\theta - g(V_r^2 - V_r V_s \cos\theta) \\ Q_r = -b(V_r^2 - V_s V_r \cos\theta) - gV_s V_r \sin\theta \end{cases} \quad (18)$$

種子島第一側については

$$\begin{cases} 0.517 = V_s \sin\theta / 0.3313 \\ -0.151 = -(1 - V_s \cos\theta) / 0.3313 \end{cases} \quad (19)$$

より, $\dot{V}_s = 0.965 \angle 10.22^\circ$ 。新種子島側については

$$\begin{cases} 0.468 = V_s \sin\theta / 0.408 \\ -0.199 = -(1 - V_s \cos\theta) / 0.408 \end{cases} \quad (20)$$

より, $\dot{V}_s = 0.9384 \angle 11.74^\circ$ 。

図3に基づいてアドミタンス行列を求めると次のようになる

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{11} &= 1.1506 \angle -1.2287 \\ -\dot{Y}_{21} &= 1.19053 \angle (\pi + 1.38884) \\ \dot{Y}_{22} &= 1.1267 \angle -1.33108 \\ -\dot{Y}_{12} &= 1.19053 \angle (\pi + 1.38884) \end{aligned} \quad (21)$$

発電機慣性定数を次式により計算する。

$$M = 2.74 G D^2 \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \quad (22)$$

(1) 種子島第一10号機

$$\begin{aligned} M_{10} &= 2.74 \times 36.68 \times 10^3 \times \left(\frac{400}{1000} \right)^2 \\ &= 1.608 \times 10^4 \quad [\text{kW} \cdot \text{sec}] \\ &= 16.08 \quad [\text{MW} \cdot \text{sec}] \end{aligned} \quad (23)$$

10MVAbase では $M_{10} = 1.608$ となる。

(2) 種子島第一11号機

$$\begin{aligned} M_{11} &= 2.74 \times 38.88 \times 10^3 \times \left(\frac{400}{1000} \right)^2 \\ &= 1.705 \times 10^4 \quad [\text{kW} \cdot \text{sec}] \\ &= 17.05 \quad [\text{MW} \cdot \text{sec}] \end{aligned} \quad (24)$$

10MVAbase では $M_{11} = 1.705$ となる。

(3) 新種子島2号機

$$\begin{aligned} M_2 &= 2.74 \times 34.15 \times 10^3 \times \left(\frac{514}{1000} \right)^2 \\ &= 2.472 \times 10^4 \quad [\text{kW} \cdot \text{sec}] \\ &= 24.72 \quad [\text{MW} \cdot \text{sec}] \end{aligned} \quad (25)$$

10MVAbase では $M_2 = 2.472$ となる。

従って $M_1 = M_{10} + M_{11} = 3.313$, $M_2 = 2.472$ である。

以上より, 合成共振周波数 (臨界周波数) f_s を求める。

$\omega_0 = 2\pi \times 60$, $M_1 = 3.313$, $M_2 = 2.472$, $V_s = 0.965$, $V_r = 0.9384$, $Y_{12} = 1.19053$, $\alpha_{12} = \pi/2 - 1.38884$ を (17) 式に代入することにより共振周波数 f_s は

$$\begin{aligned} f_s &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega_0 (M_1 + M_2)}{M_1 M_2} (V_s V_r Y_{12} \cos \alpha_{12})} \\ &= 2.45101 \quad [\text{Hz}] \end{aligned} \quad (26)$$

となり, 周期 T_s は

$$T_s = \frac{1}{f_s} = 0.408 \quad [\text{sec}] \quad (27)$$

となる。これは, 電力動揺時の自動オシログラフによって実測された周期 0.4 秒 ~ 0.43 秒とほぼ一致している (図15参照)。

2.2 ディーゼルエンジン脈動トルク共振周波数

原動機 (ディーゼルエンジン) 間の機械的振動について考える。ディーゼル発電機は往復動機関であるディーゼル機関に直結されているので駆動トルクに脈動成分が含まれる。ディーゼル機関の回転速度を N (rpm) とすれば4サイクルエンジンでは, 気筒数が C のとき各気筒発生トルクの不平衡により脈動トルク周波数 $\left\{ \frac{N}{2} j : 1 \leq j \leq C \right\}$ [Hz] が発生する^{2, 3)}。種子島第一発電所10, 11号機および新種子島発電所2号機のディーゼルエンジンの脈動トルクについて表1に示す。

駆動トルクによる脈動成分が $\Delta P_i = a_i \sin 2\pi f_i t$ と仮定したとき

$$\begin{aligned} \Delta P_1 - \Delta P_2 &= a_1 \sin 2\pi f_1 t - a_2 \sin 2\pi f_2 t \\ &= \Delta a \sin 2\pi f_1 t + 2a_2 \cos 2\pi f_1 t \cdot \sin 2\pi f_m t \end{aligned} \quad (28)$$

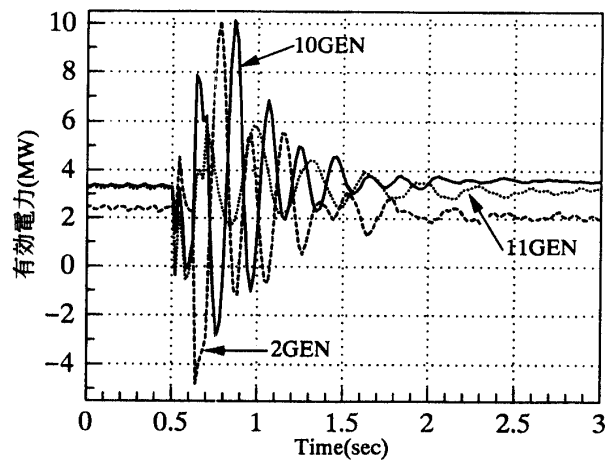
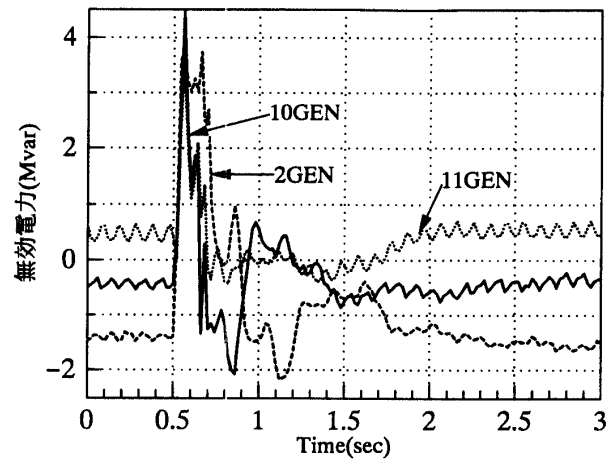
表2 発電機定数 (自己容量ベース%値)

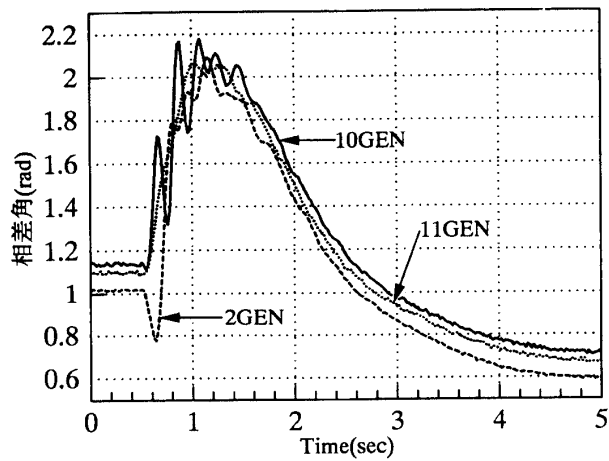
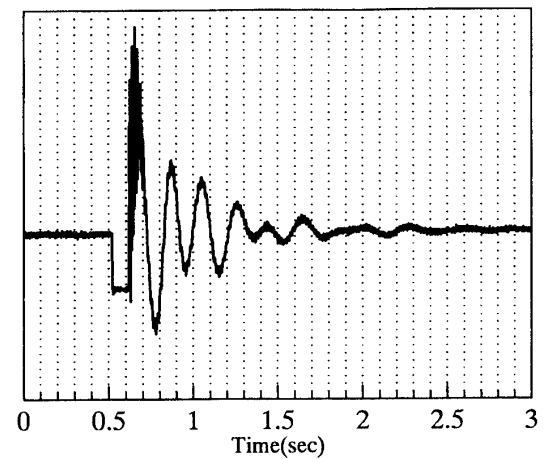
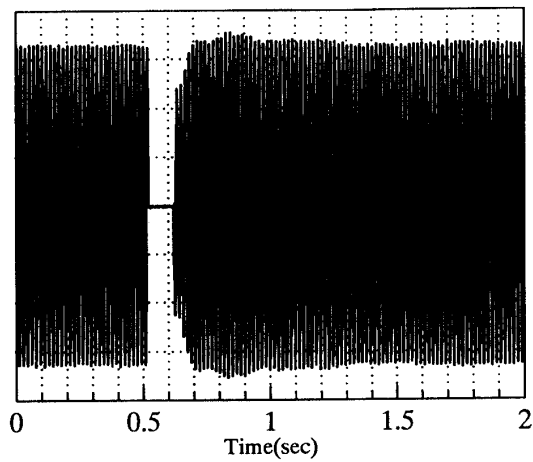
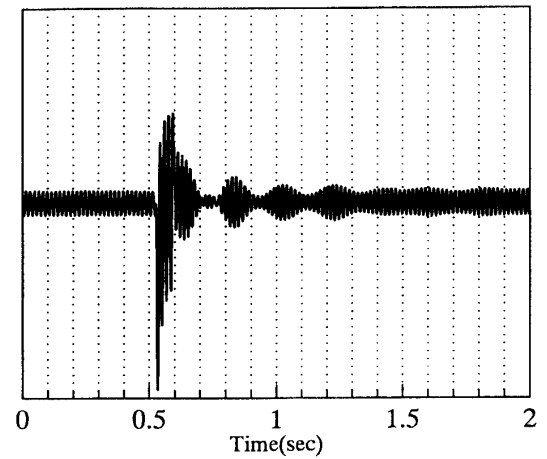
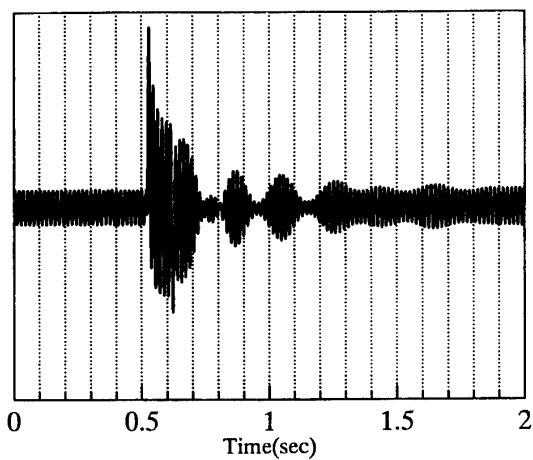
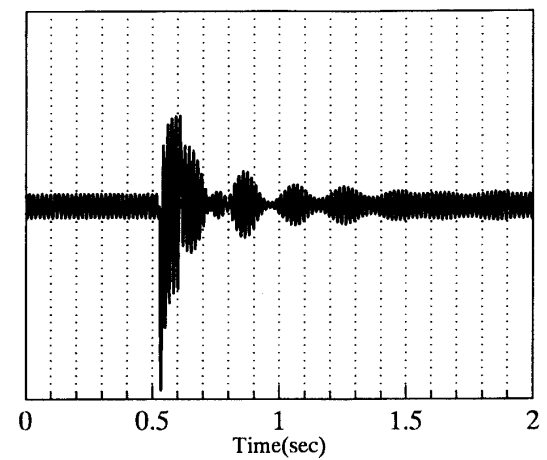
	10号	11号	2号
MW	4.5	4.5	6.0
MVA	5.0	5.0	7.5
$r.p.m$	400	400	514
短絡比	1.0	1.0	0.918
$t-m^2$	36.68	38.88	34.15
X_d	100	96	114
X_q	61	58	68.5
X'_d	30	37	30.6
X'_q	61	58	68.5
X''_d	23	27	19
X''_q	43	45	22
X_0	12	6	10.2
X_2	25	34	21
T'_{d0}	1.0(sec)	2.5(sec)	3.4(sec)
T''_{q0}	0.05(sec)	0.04(sec)	0.14(sec)

表3 AVR 設定値

	10号	11号	2号
K_A	100	100	80
K_D	0	0	0.044
K_E	0.76	0.76	1
T_1	0.01	0.01	0.01
T_2	—	—	0.002
T_A	0.02	0.02	0.002
T_{D1}	—	—	0.32
T_{E1}	—	—	0.03
T_{E2}	0	0	3.4
T_{E3}	0.002	0.002	1.632
E_{A1}	1.5	1.5	10
E_{A2}	-1.5	-1.5	-10
E_{C1}	2.8	2.8	5
E_{C2}	-2.8	-2.8	-5
K_4	0.08	0.025	0.067
K_5	0.3	0.3	1.5
K_6	0.5	0.5	1.44
E_{f0}	1	1	1

種子島2号機の計3機で運転中、種子島第一発電所側66 kV 母線が三相短絡事故を起こし、 $n=6$ サイクル後復帰した場合の実験を行った。データとしては10, 11, 2号発電機の有効電力 (P_a)、無効電力 (P_r)、相角 (δ) を測定した。さらに種子島第一発電所側の中種子変電所入り口における R 相の電圧 (V)、電流 (I) 及び有効電力 (P) も測定した。比較のため、 $n=4, 5, 7$ サイクルのときの R 相の電流 (I) を図12～図14にそれぞれ示す。これより n が7以上では脱調することがわかる。

図6 発電機有効電力の時間応答 ($n=6$)図7 発電機無効電力の時間応答 ($n=6$)

図8 発電機相差角の時間応答 ($n=6$)図11 中種子入り口有効電力の時間応答 ($n=6$)図9 中種子入り口 R 相電圧の時間応答 ($n=6$)図12 中種子入り口 R 相電流の時間応答 ($n=4$)図10 中種子入り口 R 相電流の時間応答 ($n=6$)図13 中種子入り口 R 相電流の時間応答 ($n=5$)

実データと電力系統解析シミュレータ実験の結果を比較する。図15に電力動揺発生時の実データ、図16に $n=16$ のシミュレーション実験の結果を示す。いずれも、種子島第一発電所側の中種子変電所入り口における電圧および電流のグラフである。図15、16より、実データ、シミュレーション実験ともに電力動揺の周期は約 0.4 秒であることがわかる。

4 ま と め

以上、種子島電力系統動揺の理論的研究とシミュレーション実験を行った。その結果、種子島第一発電所10、11号機と新種子島発電所2号機を並列運転した場合におこる電力動揺の原因としては、同期機間の電氣的振動とディーゼルエンジン間の機械的振動の間の共振が考えられる。

よって、安定な運転を行うためには、系統の同期機間電氣的振動とディーゼルエンジン間機械的振動との間の共振を避ける必要があると思われる。さらに詳細な研究は、今後に残された課題である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、各種多大のご援助と便宜と御指導を賜った、九州電力株式会社と九州電機製造株式会社の各諸氏に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 高田, 八野, 宮下, 辻: 非線形システムの動揺シミュレーションについて 一種子島電力系統の場合一, 鹿児島大学工学部研究報告第37号, pp.43-50, (1995)
- 2) 山村, 他: 電気工学ハンドブック, 電気学会, (1978)
- 3) 岩満: 現場のディーゼル発電技術, オーム社, (1979)
- 4) 高田, 宮下, 松山, 八野, 辻: 種子島電力系統の動揺シミュレーション, 平成7年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 606, p.344, (1995)
- 5) 高田, 宮下, 八野, 辻: 離島電力系統の動揺シミュレーション, 平成7年度計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, 102, pp.5-6, (1995)

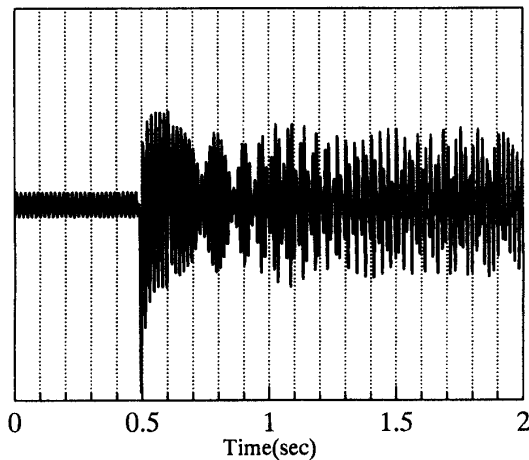


図14 中種子入り口 R 相電流の時間応答 ($n=7$)

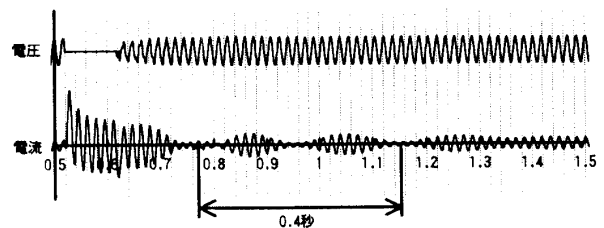


図16 シミュレータ実験 ($n=6$)

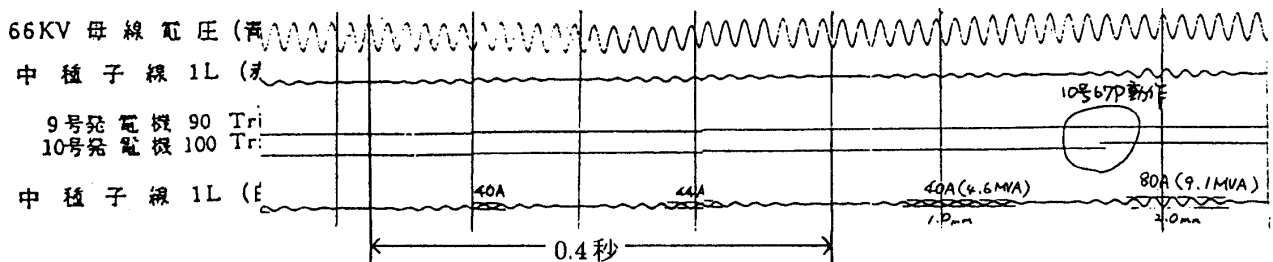


図15 実データ