

# 研究論文

## 亜音速ダイアゴナル形 M H D 発電機 - 電力系統接続システムに関する研究

京都大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻

三好誠司

昭和63年 2月16日

# 目次

序論	1
本論	3
第1章 解析手法	3
§ 1. 1 MHD発電機の解析手法	3
1.1.1 流体力学的諸量について	3
1.1.2 電磁気学的諸量について	7
1.1.3 計算条件	10
§ 1. 2 同期発電機の解析手法	10
1.2.1 仮定	10
1.2.2 座標軸について	11
1.2.3 単位法について	12
1.2.4 基礎方程式	13
1.2.5 数値解析手法	15
§ 1. 3 電力システムの解析手法	15
1.3.1 他励式インバータ	15
1.3.2 変圧器	16
1.3.3 調相器、フィルタ	16
1.3.4 回路網の数値解析手法	17
§ 1. 4 MHD発電機、同期発電機、電力システムの接続	17
1.4.1 同期発電機と電力システムの接続	17
1.4.2 MHD発電機と電力システムの接続	18
第2章 定常解析	19
§ 2. 1 初期状態の設定	19
2.1.1 MHD発電機の初期状態の設定	19
2.1.2 同期発電機の初期状態の設定	20
2.1.3 電力システムの初期状態の設定	21
2.1.4 システム全体の初期状態の設定	21

§ 2. 2	定常運転時の特性	21
第 3 章	事故解析	24
§ 3. 1	インバータの点弧失敗事故	24
3.1.1	結果及び考察	24
3.1.2	事故後の対策	26
§ 3. 2	交流系統一線断線事故	27
3.2.1	結果及び考察	27
3.2.2	事故後の対策	28
§ 3. 3	交流系統一線地絡事故	29
3.3.1	結果及び考察	30
第 4 章	シード率変化時の特性解析	32
§ 4. 1	解析手法	32
§ 4. 2	解析結果	33
4.2.1	シード率増大時	33
4.2.2	シード率減少時	34
結論		36
謝辞		38
参考文献		39
付録 1	諸量について	
§ 付 1. 1	MHD 発電機に関する諸量	
§ 付 1. 2	同期発電機に関する諸量	
§ 付 1. 3	電力系統に関する諸量	
付録 2	人工粘性項について	
付録 3	同期発電機の行列	
付録 4	回路網の解析手法	
付録 5	電力系統と同期発電機の接続を表す行列	

インバータは負荷である交流系統から電力を得ることによって消弧を行うもので、構造が単純であり、従って素子の数も少なく動作が安定しているなどの利点があるため実際にも多く稼働している。

本研究室においてはいままでに超音速MHD発電機あるいは自励式インバータを含むシステムについて詳細な解析が行われてきた<sup>3-5)</sup>が、本研究においてはMHD発電機として亜音速ダイアゴナル形発電機を採用し、インバータとしては他励式を採用する。本研究の目的は、MHD発電機の電力が他励式インバータを経て同期発電機の電力と並列に無限大母線に供給されるシステムについて、定常時、事故時そしてシード率変化時の特性解析を数値シミュレーションにより行うことにある。なお本研究は、わが国で次期大型パイロットプラントとして検討されている熱入力100MW級 電気出力10MW級MHD発電機に関する研究の一部をなすものである。

---

\* ) 作動流体が十分な導電率を有するように、アルカリ金属を燃焼ガスに加えること

# 本論

## 第1章 解析手法

本研究では、MHD発電機の出力をインバータを経て、同期発電機の出力と並列に商用系統に供給する場合を想定する。インバータとしては他励式を採用しているため、インバータで消費される多大な無効電力を補償する調相器、及びインバータで発生する高調波に対するフィルタを設置する。解析を行うシステムのブロック図を図1.1に示す。また、解析を行う回路を図1.2に示す。本論文中では回路中の素子について、これをその記号で表す場合が多いが、それらはすべて図1.2に示されるものである。本章では、図1.1に示した各部について、その基礎方程式、数値解析手法について述べる。

### § 1. 1 MHD発電機の解析手法<sup>6)</sup>

MHD発電機のチャンネル内部では、強磁場中を導電性流体が高速で通過するため、その解析においては電磁気学的諸量と流体力学的諸量を同時に取り扱わなくてはならない。さらに、外部回路にインバータなどを含むため、過渡状態の連続になり、また各種事故解析や動特性解析を行うために、非定常な場合にも対応できる解析を行う必要がある。

本解析においてはMHD発電機として単一負荷亜音速ダイアゴナル形MHD発電機を採用し、その準一次元解析を行う。序論においてもふれた通り、亜音速機は超音速機と異なり、その内部において下流の影響が上流に伝搬し得る。そのため、亜音速機においてチャンネル(発電部分)だけの解析はあまり意味を持たない。そこで、本解析においてはチャンネル(5.0m)前部のノズル(加速部分; 1.0m)、後部のディフューザ(減速部分; 8.0m)までを含めて計算を行う。図1.3に本研究で用いる座標系を示す。

以下にMHD発電機の基礎方程式、及び数値解析手法を、流体力学的諸量、電磁気学的諸量に分けて述べる。

#### 1. 1. 1 流体力学的諸量について

(a) 基礎方程式

本解析においては準一次元近似を仮定しているので作動流体に対する基礎方程式は以下のようなになる。

質量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A) = 0 \quad (1.1.1)$$

運動量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 A) + A \frac{\partial p}{\partial x} - A J_y B + f = 0 \quad (1.1.2)$$

これは、ナヴィエ・ストークス方程式(Navier-Stokes equation)と呼ばれるものである。

エネルギー保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho \left( \varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) A \right\} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u h_0 A) - (J \cdot E) A + q = 0 \quad (1.1.3)$$

また気体の状態方程式は次のように与えられる。

$$p = \rho R T \quad (1.1.4)$$

ただし A: ダクト断面積

u: 作動流体速度

$\rho$ : 質量密度

p: 気体圧力

T: 気体温度

R: 気体定数

f: 摩擦損失

q: 熱損失 (熱伝導損 + 放射損)

$\varepsilon$ : 内部エネルギー

$h_0 = h + \frac{u^2}{2}$  : トータルエンタルピー

$\mathbf{J} = (J_x, J_y, 0)$  : 電流密度

$\mathbf{E} = (E_x, E_y, 0)$  : 電界

$\mathbf{B} = (0, 0, B)$  : 磁束密度

( $f$ 、 $q$ については付録1を参照されたい)

なお、本論文においては $A$ 、 $B$ などの太字は、行列やベクトルを表すものとする。

## (b) 数値解析手法

### 1. 諸量の初期状態の設定

本研究では、MHD発電機が定常運転をしている状態からの解析を考えるので、時間依存計算を行う前にまず定常計算により、MHD発電機ダクトの形状設計を行い、同時にダクト内の圧力、温度等の諸量の初期分布を求める。なお、この定常計算は、ダクト内の流速分布をその条件として与えることにより行う。その際の流速分布は、図1.4に示されるもので、ノズル内部、ディフューザ内部においては滑らかに変化し(300m/s→842m/s, 842m/s→300m/s)、チャンネル内部においては等速(842m/s)となるものである。

(1.1.1)式～(1.1.3)式において、

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u' \quad (: \text{given})$$

とおくと、まず(1.1.1)式より、

$$\rho u A = m_0 \quad (1.1.5)$$

よって、

$$A = \frac{m_0}{\rho u} \quad (1.1.6)$$

(1.1.2)式、(1.1.5)式より、

$$\frac{\partial p}{\partial x} = J_y B - \frac{m_0 u'}{A} - \frac{f}{A} \quad (1.1.7)$$

(1.1.3)式、(1.1.5)式より、

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{A(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E})}{m_0} - u u' - \frac{q}{m_0} \quad (1.1.8)$$

(1.1.6)式～(1.1.8)式に気体の状態方程式(1.1.4)、さらに後述する電磁気学的諸量に関する方程式を連立させ、ルンゲ・クッタ・ギル法(Runge-Kutta-Gill method)<sup>7)</sup>を用いて解くことによりダクト形状、及びダクト内諸量の初期分布が求まる。

## 2. 時間依存計算

(1.1.6)式～(1.1.8)式を解くにあたり、 $\rho A$ 、 $\rho u A$ 、 $\rho(\epsilon + \frac{u^2}{2})A$ を独立変数に選び、次のように書き直す。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \mathbf{S} \quad (1.1.9)$$

ただし、

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho A \\ \rho u A \\ \rho(\epsilon + \frac{u^2}{2})A \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u A \\ (\rho u^2 + p) A \\ \rho u h_0 A \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ A \mathbf{J} \cdot \mathbf{B} - f \\ A(\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) - q \end{bmatrix}$$

既に述べたように、本研究の解析における時間依存計算には非定常な場合にも対応できる計算を行う必要がある。そこでマコーマック法(MacCormack method)<sup>8)</sup>を用いて(1.1.9)式を解く(実際にはこれらの方程式に人工粘性項を加えた式を解いている。人工粘性項については付録2を参照されたい)。マコーマック法は予測ステップに前進差分、修正ステップに後退差分を用いる2段階差分法の一つであり、その差分スキームは次のようになる。



予測ステップ

$$\Delta U_j^n = - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{j+1}^n - F_j^n) + \Delta t S_j^n \quad (1.1.10)$$

$$U_j^* = U_j^n + \Delta U_j^n \quad (1.1.11)$$

修正ステップ

$$\Delta U_j^* = - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_j^* - F_{j-1}^*) + \Delta t S_j^* \quad (1.1.12)$$

$$U_j^{n+1} = U_j^* + \frac{1}{2} (\Delta U_j^n + \Delta U_j^*) \quad (1.1.13)$$

ただし  $U_j^n$  は、 $U(j \Delta x, n \Delta t)$  を表している。

(1.1.13)式で求まった  $U$  を用いて作動流体速度  $u$ 、圧力  $p$ 、温度  $T$  が計算される (詳細については付録 1 を参照されたい)。

### 1. 1. 2 電磁気学的諸量について

本解析では燃焼ガスを作動流体としており、この場合、電子分圧の傾き、イオンスリップの影響が無視できるので、一般化されたオームの法則は次式で表される。

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \frac{\beta}{|\mathbf{B}|} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \quad (1.1.14)$$

ただし  $\sigma$ : ガスの導電率

$\beta$ : ガスのホールパラメータ

この一般化されたオームの法則に対して準一次元近似を仮定し、さらに電極部の電圧降下を考慮に入れることにより、次のような  $x$ 、 $y$  成分に関する式が導かれる。

$$\begin{cases} J_x + \beta J_y = \sigma E_x \\ -\beta J_x + J_y = \sigma (E_y - u B + \frac{\Delta V}{h}) \end{cases} \quad (1.1.15)$$

ただし、 $h$  はダクト高さ、 $\Delta V$  は電極電圧降下である。

ところで、考察している条件では、電気的中性はよく保たれている。さらに、作動ガスの磁気レイノルズ数が小さいため、印加磁界のみを考え、誘導磁界は無視する。また印加磁界は時間的に変化しない。これより、電界  $E(x, t)$ 、電流密度  $J(x, t)$  は次の方程式を満足する。

マクスウェルの第2電磁方程式<sup>9)</sup>

$$\nabla \times E = 0 \quad (1.1.16)$$

電流の連続式

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (1.1.17)$$

さらに、リーク電流を考慮に入れ、また、本解析で考えているMHD発電機がダイアゴナル形であることから、さきの(1.1.16)式、(1.1.17)式は次のように変形できる。

$$E_y = -a E_x \quad (1.1.18)$$

$$(J_x - a J_y) A = I + I_L \quad (1.1.19)$$

$$I_L = -\frac{E_x}{R_L} A$$

$$a = \cot \theta_0$$

ただし、 $\theta_0$ : ダイアゴナル角

$I$ : 負荷電流

$I_L$ : リーク電流

$R_L$ : リーク抵抗

(1.1.15)式、(1.1.18)式、(1.1.19)式を連立させることにより  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $J_x$ 、 $J_y$  が計算される。すなわち、

$$E_x = \frac{\frac{1 + \beta^2}{a + \beta} \frac{1}{\sigma A} - u B \left(1 - \frac{\Delta V}{u B h}\right)}{\frac{1 + \beta^2}{a + \beta} + \frac{1 + \beta^2}{(a + \beta) \sigma R_L}} \quad (1.1.20)$$

$$E_y = -a E_x \quad (1.1.21)$$

$$J_y = \frac{1}{a + \beta} \left\{ -\frac{I}{A} + \sigma \left( 1 + \frac{1}{\sigma R_i} \right) E_x \right\} \quad (1.1.22)$$

$$J_x = \sigma E_x - \beta J_y \quad (1.1.23)$$

なお、MHD発電機の電極幅は有限であるため、ホール電界  $E_x$  が短絡され、電極端において電流集中、チャンネル端末領域においてうず電流が生じ、発電機の特性が低下する。また、作動ガスプラズマの諸特性は  $x$  方向のみならず、 $y$  方向においても変化する。これらの有限分割、及び  $y$  方向におけるプラズマの不均一性の影響を  $G$  因子で表し、

$$\frac{\sigma}{G} \rightarrow \sigma \quad , \quad \frac{\beta}{G} \rightarrow \beta$$

の修正を加えることにする。

これらの値からさらに、

$$V_t = - \int_0^L E_x dx \quad (1.1.24)$$

$$R_i = \int_0^L \frac{1 + \beta^2}{1 + a^2} \frac{1}{\sigma A} dx \quad (1.1.25)$$

$$V_0 = \int_0^L \frac{1 + \beta^2}{1 + a^2} \left( u B - \frac{dV}{h} \right) dx \quad (1.1.26)$$

$$I = \frac{V_0}{R_i + R_l} \quad (1.1.27)$$

$$I_s = \frac{V_0}{R_i} \quad (1.1.28)$$

ただし、  
 $R_i$ : 内部抵抗  
 $I_s$ : 短絡電流  
 $V_t$ : 端子電圧  
 $V_0$ : 起電力  
 $L$ : チャンネル長

### 1. 1. 3 計算条件

数値計算に用いた諸量は次の通りである<sup>10)</sup>。

熱入力	$P_i = 111 \text{ MW}$
質量流量	$m_o = 25 \text{ kg/s}$
チャンネル入口圧力	$p_o = 2.9 \text{ atm}$
チャンネル入口温度	$T_o = 2650 \text{ K}$
チャンネル入口流速	$u_o = 842 \text{ m/s}$
チャンネル入口マッハ数	$M_o = 0.886$
磁束密度	$B = 2.0 + 4.0 x \quad (0 \text{ m} \leq x \leq 1 \text{ m})$
	$B = 6.0 - 0.4 (x - 1) \quad (1 \text{ m} \leq x \leq 4 \text{ m})$
	$B = 4.8 - 2.8 (x - 4) \quad (4 \text{ m} \leq x \leq 5 \text{ m})$

( $x$  はチャンネル入口からの距離である。図1.5を参照されたい。)

ダクト壁等価砂粒径	$k_s = 3 \text{ mm}$
G 因子	$G = 1.6$
等価壁温	$T_w = 1400 \text{ K}$
リーク抵抗	$R_L = 100 \text{ } \Omega / \text{m}$
ダイアゴナル角	$\phi = 45^\circ$
負荷電流	$I = 1000 \text{ A}$
電極電圧降下	$\Delta V$ ; $u B h$ の 20 %

### § 1. 2 同期発電機の解析手法<sup>11)</sup>

#### 1. 2. 1 仮定

同期発電機は2極円筒型とし、解析が煩雑になるのを避けるためつぎの仮定を設ける。

(1) 電機子巻線の作る起磁力は、回転子回路との相互誘導に関する限り空隙に沿って正弦波状に分布する。

(2) 電機子溝は回転子の位置と関係して回転子インダクタンスを変化させ

る原因にならない。

(3) 鉄心の飽和についてはこれを無視する。

### 1. 2. 2 座標軸について

本解析では同期発電機諸量の計算を、図1.6に示すようなd q座標軸上で考える。すなわち、N極の磁極軸の向きを直軸(d軸)、これと電気角で $\pi/2$ だけ回転方向より遅れた向きを横軸(q軸)にとり、回転角 $\theta$ の基準はa相巻線の作る磁束方向とする。

三相量、d q軸量相互の変換はパーク(Park)の変換行列を用いて行う。すなわち三相量、d q軸量の電圧、電流をそれぞれ $V_{abc}$ 、 $I_{abc}$ 、 $V_{dqo}$ 、 $I_{dqo}$ とすると、

$$\begin{aligned}V_{dqo} &= P V_{abc} \\I_{dqo} &= P I_{abc} \\V_{abc} &= P^{-1} V_{dqo} \\I_{abc} &= P^{-1} I_{dqo}\end{aligned}\tag{1.2.1}$$

ただし、

$$\begin{aligned}V_{dqo} &= (V_d, V_q, V_o) \\I_{dqo} &= (I_d, I_q, I_o) \\V_{abc} &= (V_a, V_b, V_c) \\I_{abc} &= (I_a, I_b, I_c)\end{aligned}$$

でありP、 $P^{-1}$ は

$$P = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \frac{2}{3}\cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{2}{3}\sin\theta & \frac{2}{3}\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \frac{2}{3}\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}\tag{1.2.2}$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2.3)$$

### 1. 2. 3 単位法について

本解析において同期発電機の計算には単位法を用いる。単位法は、同期機分野で伝統的に用いられてきた方法で、一般に次のような長所がある。

- (1) 全ての値が無次元になるので数式が常に簡単化される。
- (2) 数値を扱う場合は、機械の大きさや定格電圧の高低にかかわらず、各種リアクタンス等が、狭い範囲の値に落ち着く。

単位法を用いる場合の基準値として、電機子側の機械の定格値を用いる。そうすると、以下のような変換により単位法諸量が定義されることになる。

$$\left. \begin{aligned} v_a &= \frac{V_a}{E_{sn}} & , & & v_b &= \frac{V_b}{E_{sn}} & , & & v_c &= \frac{V_c}{E_{sn}} \\ i_a &= \frac{I_a}{I_{sn}} & , & & i_b &= \frac{I_b}{I_{sn}} & , & & i_c &= \frac{I_c}{I_{sn}} \\ v_d &= \frac{V_d}{E_{sn}} & , & & v_q &= \frac{V_q}{E_{sn}} & , & & v_o &= \frac{V_o}{E_{sn}} \\ i_d &= \frac{I_d}{I_{sn}} & , & & i_q &= \frac{I_q}{I_{sn}} & , & & i_o &= \frac{I_o}{I_{sn}} \\ & & & & & & & & & (p.u.) \\ v_f &= \frac{N_s}{N_f} \times \frac{V_f}{E_{sn}} \\ i_f &= \frac{2}{3} \times \frac{N_f}{N_s} \times \frac{I_f}{I_{sn}} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.4)$$

単位法では、時間についてもそのスケールの変更を行い、単位法での1秒は実時間の $1/\omega_n$ 秒にとる。すなわち、実時間の $t$ 秒は単位法では、

$$\tau = \omega_n \times t \quad (s) \quad (1.2.5)$$

である。

出力の基準値は、端子電圧、電機子電流とも定格値で力率1.0の平衡した運転をした場合の出力と取り決める。すなわち機械の定格出力ではなく定格皮相容量を基準値として用いる。そうすると単位法による機械入力は、

$$P_m = \frac{P_m}{P_{sn}} \quad (\text{p.u.}) \quad (1.2.6)$$

さらに単位法における電氣的瞬時出力は

$$\begin{aligned} p_o &= \frac{2}{3} (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) \\ &= v_d i_d + v_q i_q + 2 v_o i_o \end{aligned} \quad (1.2.7)$$

ただし(1.2.4)式～(1.2.7)式において、

$E_{an}$ : 定格電圧 (相電圧、波高値) (V)

$I_{an}$ : 定格電流 (波高値) (A)

$\omega_n$ : 定格角速度 (電気角) (rad/s)

$P_{sn}$ : 定格皮相容量 ( $= \frac{3}{2} E_{an} I_{an}$ ) (VA)

$P_m$ : 機械入力

$N_a$ 、 $N_f$ 、 $N_d$ 、 $N_q$ : 電機子巻線 (一相)、界磁巻線、制動巻線の等価直軸及び横軸回路の巻数

#### 1. 2. 4 基礎方程式

以上の仮定、手法により、同期発電機の基礎方程式は次の3つのグループにまとめられる。

##### 固定子 (電機子) 巻線の電圧方程式

$$v_d = - \frac{d}{d\tau} (X_{ad} i_d + X_{af} i_f + X_{ad} i_{Dd}) - (X_{aq} i_q + X_{aq} i_{Dq}) \frac{d\theta}{d\tau} - r_a i_d \quad (1.2.8)$$

$$v_q = - \frac{d}{d\tau} (X_{aq} i_q + X_{aq} i_{Dq}) + (X_{ad} i_d + X_{af} i_f + X_{ad} i_{Dd}) \frac{d\theta}{d\tau} - r_a i_q \quad (1.2.9)$$

$$v_o = - \frac{d}{d\tau} X_{oo} i_o - r_a i_o \quad (1.2.10)$$

## 回転子巻線の電圧方程式

(a) 界磁回路

$$v_f = \frac{d}{d\tau}(X_{frr}i_f + X_{afd}i_d + X_{afd}i_{Dd}) + r_f i_f \quad (1.2.11)$$

界磁回路は外部から直流電圧源が与えられることから

$$v_f = V_f (: \text{const.})$$

(b) 制動巻線

$$v_{Dd} = \frac{d}{d\tau}(X_{DDd}i_{Dd} + X_{ad}i_d + X_{ad}i_f) + r_{Dd}i_{Dd} \quad (1.2.12)$$

$$v_{Dq} = \frac{d}{d\tau}(X_{DDq}i_{Dq} + X_{aq}i_q) + r_{Dq}i_{Dq} \quad (1.2.13)$$

導棒の両端で短絡環により短絡されていることから  $v_{Dd} = v_{Dq} = 0$ 。

ただし、添字 f、Dd、Dq は界磁巻線回路、直軸制動巻線回路、横軸制動巻線回路を示す。また、

- $x_d$  : 直軸同期リアクタンス
- $x_q$  : 横軸同期リアクタンス
- $x_0$  : 零相同期リアクタンス
- $x_{afd}$  : 直軸電機子反作用リアクタンス
- $x_{aq}$  : 横軸電機子反作用リアクタンス
- $x_{frr}$  : 界磁巻線自己リアクタンス
- $x_{DDd}$  : 制動巻線直軸回路自己リアクタンス
- $x_{DDq}$  : 制動巻線横軸回路自己リアクタンス
- $r_a$  : 電機子巻線抵抗
- $r_f$  : 界磁巻線抵抗
- $r_{Dd}$  : 制動巻線直軸回路抵抗
- $r_{Dq}$  : 制動巻線横軸回路抵抗

である。

## 機械の運動方程式 (動揺方程式)

$$T_m \frac{d\omega}{d\tau} = p_s - p_e \quad (1.2.14)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{d\tau} \quad (1.2.15)$$



ただし、 $T_m = 4 \pi f_n H$

H: 機械の単位慣性定数

なお、計算条件として用いた同期発電機諸量の具体的な数値については付録1を参照されたい。

### 1. 2. 5 数値解析手法

電機子及び回転子巻線の電流、さらに回転子角、角速度を独立変数に選び、端子電圧を与えることにより以上の連立一次微分方程式（(1.2.8)式～(1.2.15)式）を解く。このとき、(1.2.8)式、(1.2.9)式においては $d\theta/d\tau$ を $\omega$ と置き換え、前ステップの値で近似することにより方程式を線形化する。そうすると方程式を次のように行列表示することができる（詳細については付録3を参照されたい）。

$$A_s \frac{dX_s}{dt_s} + B_s X_s = C_s \quad (1.2.16)$$

これより差分式は、

$$A_s \frac{X_{s(n)} - X_{s(n-1)}}{\Delta t_s} + B_s X_{s(n)} = C_s \quad (1.2.17)$$

これを变形して、

$$X_{s(n)} = \left( \frac{A_s}{\Delta t_s} + B_s \right)^{-1} \left\{ \frac{A_s}{\Delta t_s} X_{s(n-1)} + C_s \right\} \quad (1.2.18)$$

## § 1. 3 電力システムの解析手法

### 1. 3. 1 他励式インバータ<sup>(12-16)</sup>

インバータは、他励式のダブルサイリスタブリッジを用いる。点弧角 $\alpha$ は無量大母線相電圧の交点を基準として $150^\circ$ である。解析においては、サ

イリスタは単なる抵抗とし、そのON、OFFに応じてその抵抗値を変化させる。

### 1. 3. 2 変圧器

MHD発電機側の変圧器は、Y-Y、 $\Delta$ -Y結線とし、これにより第5、7高調波等の相殺が期待される<sup>17)</sup>。漏れインピーダンスは直列に入れることで模擬する。

### 1. 3. 3 調相器、フィルタ

他励式インバータは多大な無効電力（有効電力の $\tan(\pi - \alpha)$ 倍）を消費するので、いま需要家である無限大母線において0.9(遅れ)~1くらいの力率を実現するためには、調相設備が必要となってくる。無効電力の値から、必要なコンデンサの値が決まる。ところが本解析の場合、MHD発電機からの電力と並列に同期発電機からも電力が供給されるので、同期発電機でどれほどの無効電力が発生しているのかも問題になる。いま同期発電機がある遅れ力率で運転していて、他励式インバータで消費される無効電力と同期発電機で発生する無効電力がちょうど等しいとき、受電端では力率1が実現され調相設備は不要になる（実際には変圧器漏れインピーダンスや送電線インピーダンスにインダクタンス分が存在するため小さい調相設備は必要になる）。このように並列に電力を供給するシステムにおいて他励式インバータと同期発電機は相性がよいと言えよう。しかしいま簡単のために、他励式インバータの消費する無効電力をちょうど補償するように素子の値を決めることにする。

また、送電線電流は高調波を多く含むため、高調波除去のためのフィルタを設置しなければならない。ここでは、特に大きな値を持つ第11、13高調波に対してフィルタを設計する。

まず、補償しなければならない無効電力の値から必要なキャパシタンスを決定し、これを調相器で1/2、フィルタで1/4ずつ分担させ、次にフィルタについては要求される除去したい周波数、調相器については回路で発生し得ない第4高調波にそれぞれ共振するようインダクタンスを決定する。

さらにQ値が50になるよう抵抗を決定する。

#### 1. 3. 4 回路網の数値解析手法<sup>18, 19)</sup>

回路網の状態方程式は、混合解析の手法を用いることにより次のような1階の常微分方程式として記述できる(詳細は付録4を参照されたい)。

$$A_p \frac{dX_p}{dt_p} + B_p X_p = C_p \quad (1.3.1)$$

なお、電力系統各部の具体的な値については付録1を参照されたい。

### § 1. 4 MHD発電機、同期発電機、電力系統の接続

#### 1. 4. 1 同期発電機と電力系統の接続

同期発電機の方程式(1.2.16)に系統の方程式(1.3.1)、および三相量-dq軸諸量の変換式(1.2.1)、(1.2.4)を連立させて解く。すなわち、以下の4式を連立させる。

$$A_s \frac{dX_s}{dt_s} + B_s X_s = C_s \quad (1.4.1)$$

$$A_p \frac{dX_p}{dt_p} + B_p X_p = C_p \quad (1.4.2)$$

$$I_{abc} = P^{-1} \cdot I_{an} I_{dqo} \quad (1.4.3)$$

$$V_{dqo} = \frac{P}{E_{an}} V_{abc} \quad (1.4.4)$$

これらの方程式を連立させ、差分式に書き換えると次のようになる(詳細については付録5を参照されたい)。

$$A_t \{X_{t(n)} - X_{t(n-1)}\} + B_t X_{t(n)} = C_{t(n)} \quad (1.4.5)$$

上式を変形して、

$$X_{t(n)} = (A_t + B_t)^{-1} \{A_t X_{t(n-1)} + C_{t(n)}\} \quad (1.4.6)$$

#### 1. 4. 2 MHD 発電機と電力系統の接続

数値解析上、MHD 発電機と回路網を同時に解くことは困難であるため、時間ステップ毎にそれぞれ独立に解析して結合する。すなわち、MHD 発電機をその起電力と内部抵抗をもつ等価電源として回路網を解き、得られた等価電源の電流をMHD 発電機負荷電流として新たなMHD 発電機の状態を計算し起電力、内部抵抗を得て次のステップでの回路網計算に用いるのである。

## 第2章 定常解析

本章では、まず各部における初期状態の設定について述べ、さらに定常運転時の特性解析の結果を示し考察を行う。なお、本章及び次章においてはMHD発電機作動流体として重油空気燃焼ガスを $K_2SO_4$ でシード（重量比1.0%）したものをを用いているが、その特性については付録1を参照されたい。また、インバータの点弧角は $150^\circ$ とする。

ところで、本論文中では回路中の素子について、これをその記号で表す場合が多いが、それらはすべて図1.2に示されるものである。また、 $Z_{11} \sim Z_{13}$  からなる回線の三相をそれぞれa相、b相、c相と呼ぶのに対し、 $Z_{14} \sim Z_{16}$  からなる回線の三相をa'相、b'相、c'相と呼ぶことにする。また今後、本論文中の図において、複数の曲線が描かれている場合は、実線がa, a'相、波線がb, b'相、一点鎖線がc, c'相を表すものとする。

### § 2. 1 初期状態の設定

#### 2. 1. 1 MHD発電機の初期状態の設定

§ 1. 1で述べたようにルンゲ・クッタ・ギル法を用いてMHD発電機ダクトの形状及び諸量の初期分布を計算する。求めた諸量の初期分布を図2.1に示す。(a)はダクト断面積、(b)は流速 $u$ 、マッハ数 $M$ 、圧力 $p$ 、温度 $T$ 、(c)は電界の $x$ 成分 $E_x$ 、電界の $y$ 成分 $E_y$ 、電流密度の $x$ 成分 $J_x$ 、電流密度の $y$ 成分 $J_y$ である。ダクトの形状は、ノズルはすぼまり、チャンネル、ディフューザはひろがるものであり、正方形断面を考え合わせるとチャンネルでの最大斜度は $2.29^\circ$ （ノズル入口から4.55m）、ディフューザでの最大斜度は $2.28^\circ$ （ノズル入口から13.95m）となる。これは境界層剥離（Separation）の起こる心配のない斜度である。圧力、温度はチャンネル内で激減する。その後圧力は、ディフューザ内でやや回復する。ただし、ここで言う圧力とは静圧のことである。流速はチャンネル内で一定であるが、マッハ数は少しずつ増大し、その最大値は約0.95である。電氣的諸量（ $E_x$ 、 $E_y$ 、 $J_x$ 、 $J_y$ ）の分布には磁束密度の分布が大きく影響していることがわかる。なお電氣的

諸量についてはチャンネル内でのみ計算を行っている。

このとき、MHD発電機の発電特性は以下の通りである。

電気出力	$w = 13.1 \text{ MW}$	
熱損失	$Q_{\text{loss}} = 20.1 \text{ MW}$	
		$\left[ \begin{array}{ll} \text{ノズル} & 2.40 \text{ MW} \\ \text{チャンネル} & 9.06 \text{ MW} \\ \text{ディフューザ} & 8.65 \text{ MW} \end{array} \right.$
エンタルピー抽出率	$\eta = 11.6 \%$	
起電力	$V_0 = 24.0 \text{ kV}$	
内部抵抗	$R_i = 10.86 \Omega$	
負荷抵抗	$R_l = 13.13 \Omega$	

この状態からこれも § 1. 1 で述べたようにマコーマック法を用いて時間依存計算を行うわけだが、システム中での運転にさきだちMHD発電機単独で、入力となる負荷電流を一定として 360ms計算を行った。その時の流速分布の時間変化を図 2.2 に示す。ルンゲ・クッタ・ギル法とマコーマック法が完全に同値でないため変動がある。その際、亜音速機の特徴として下流からの影響が大きな変動に結びついていることがわかる。約 300ms で定常に達し、その時の流速分布は図 1.3 に示した当初の設定とはかなり異なったものとなっている。しかし、この時の諸量の分布を以後の解析におけるMHD発電機諸量分布の初期値として用いることにする。

## 2. 1. 2 同期発電機の初期状態の設定

同期発電機についてもMHD発電機と同じように停止状態からの起動は考えず、定常運転をしている状態で他の各部と接続する。同期発電機はその名の通り電力系統側と同期していることが運転を行うにあたり必要不可欠である。ここでは簡単な潮流計算により初期相差角  $\theta_0$  を決定した(ここでの相差角とは、無負荷誘導起電力と無限大母線電圧の位相差のことである)。

$$\theta_0 = 45^\circ$$

また、制動巻線電流初期値は d 軸、q 軸共に零とし、角速度初期値は

定格角速度 ( $\omega_0 = 2\pi f$ ) とする。

以上の初期値を基に、入力として正弦波端子電圧を与えることにより同期発電機単独計算を60周期行った結果を図2.3に示す。(a)は回転子角偏差(相差角と初期相差角の差)、(b)は回転子角速度、(c)は電気出力、(d)は電機子巻線電流、(e)は界磁巻線電流、(f)はd軸制動巻線電流、(g)はq軸制動巻線電流である。出力、制動巻線電流、電機子巻線電流は約200msで初期の大きな変動状態から脱している。しかし回転子角偏差をみると同期発電機はこの時点ではまだ落ち着いていないと言えないことがわかる。これは同期発電機の機械の慣性定数が大きいためである。そこでこの図から、回転子が落ち着くであろう相差角を推定し、その値を新しい初期相差角とする。それ以外の諸量については、この計算の最終値を新しい初期値とする。

### 2. 1. 3 電力システムの初期状態の設定

電力システムを定常に導くにあたって、MHD発電機を2. 1. 1で求めた定常運転時におけるMHD発電機の起電力、内部抵抗をその起電力、内部抵抗とするような等価電源に、また同期発電機を2. 1. 2から求めた定常運転時と等価な正弦波電流源に置き換える。そして時間依存計算を行い定常に達したところでそれを電力システムの初期値とする。

### 2. 1. 4 システム全体の初期状態の設定

各部のうち、MHD発電機に関しては等価電源を用い、それ以外の部分については以上求めた初期値を用いてしばらく接続計算(回転子角偏差については2. 1. 2に述べた方法で補正しながらの計算)を行い、その結果を各部の新しい初期値とする。以後の計算はすべてここから行うものとする。

## § 2. 2 定常運転時の特性

本節では2. 1. 4で得られた初期値から3周期の定常運転を行った結果について述べる。図2.4(a)、(b)はそれぞれMHD発電機端子電圧、負

荷電流であり、図2.4(c)は高速フーリエ変換によりMHD発電機負荷電流の高調波解析を行った結果である。本解析ではMHD発電機端子電圧としてR<sub>d</sub>の電圧を用いたため、MHD発電機の端子電圧にZ<sub>v</sub>の電圧降下が加えられた値となっており、基本周波数の12倍の周波数の変動が大きくなっている。また以後本論文におけるMHD発電機出力の高周波の変動も同じ理由によるものである。負荷電流は約1000Aである。また負荷電流には、交流側の基本周波数の12n(n=1,2,…)倍の周波数を持つリップルが現れている。これは、12個のサイリスタの点弧動作に起因するものである。しかし最大の12倍のもので直流分の0.08%程度である。また、この時のMHD発電機起電力は23.8kV、出力は13.1MWであり、内部抵抗は10.67Ω、負荷率は0.545である。

図2.4(d)~(k)にMHD発電機内部諸量分布の時間変化を示す。(d)は圧力、(e)は温度、(f)は流速、(g)はマッハ数、(h)は電界のx成分、(i)は電界のy成分、(j)は電流密度のx成分、(k)は電流密度のy成分である。諸量は定常状態を維持しており、インバータの動作により負荷が脈動する条件においてもMHD発電機の安定した運転が可能であることがわかる。

図2.5(a)、(b)は、それぞれ同期発電機の端子電圧、及び電機子巻線電流である。端子電圧、電機子巻線電流共に高調波の少ない正弦波形が得られており、端子電圧は相電圧実効値で10.1kV、電機子巻線電流は実効値で1.26kAである。

図2.5(c)、(d)、(e)はそれぞれ界磁巻線電流、d軸制動巻線電流、q軸制動巻線電流である。いずれも十分定常に達していることがわかる。界磁巻線電流は239Aである。界磁巻線電流、制動巻線電流共に基本波の12倍周波数の高調波がみられるが、これはインバータの12個のサイリスタの点弧動作の影響である。

図2.5(f)、(g)はそれぞれ同期発電機の出力、回転子角速度である。出力電力は30MWであり、同じく第12高調波がみられる。電機子角速度は機械の慣性定数が大きいいため大きな変動はなく、約377(rad/s)でほぼ一定になっている。またこのとき相差角は40.97°である。

図2.6(a)、(b)はそれぞれサイリスタS<sub>01</sub>の印加電圧、及びインバータ上側ブリッジの上側の3つのサイリスタS<sub>01</sub>、S<sub>03</sub>、S<sub>05</sub>の電流波形であ



る。図2.6(a)において印加電圧が負になっているところが転流余裕角を示しており、図2.6(b)で $S_{01}$ 、 $S_{03}$ 、 $S_{05}$ の電流波形の重なっている部分が転流重なり角を示しており、約 $6.6^\circ$ である。点弧角が $150^\circ$ であることから単純に計算すると転流余裕角は約 $23.4^\circ$ となる。しかし、本解析では点弧角は無限大母線電圧を基準にしており、インバータと無限大母線の間にはインダクタンス等が含まれていることを考え合わせると、実際の転流余裕角はもっと小さくなっていると思われる。

図2.6(c)、(d)、(f)、(g)はそれぞれ上側及び下側変圧器の一次側、二次側電流である。きれいな矩形波がみられ、特に下側変圧器では $\Delta$ - $Y$ 結線のため一次側、二次側で電流波形が変化しており、インバータ、変圧器が理論通りの動作、はたらきをしていることがわかる。図2.6(e)は上側変圧器一次側電流の高調波解析結果である。第 $(6m \pm 1)$ 高調波( $m = 1, 2, 3 \dots$ )が存在し、大きな値を持つ第5、7高調波でそれぞれ基本波の20.0%、14.1%となっている。

図2.6(h)、(i)はそれぞれ第11、13高調波フィルタの電流であり、図2.6(j)は調相器の電流である。

図2.6(k)は送電線電流であり、ひずみの少ない三相電流となっている。また、受電端における力率は0.92(遅れ)である。図2.6(l)はその高調波解析の結果であり、変圧器電流に含まれていた第5、7高調波は相殺されている。これは既に述べたように変圧器を $Y$ - $Y$ 、 $\Delta$ - $Y$ 結線した効果である。また変圧器電流では8.8%、7.4%含まれていた第11、13高調波もそれぞれ0.37%、0.24%にまで抑制されている。これは、同期発電機の出力が加えられたことにもよるが、第23、25高調波との比較からフィルタの効果も大きいことがわかる。

## 第3章 事故解析

本章では、システムが十分定常状態に達した後、インバータ及び電力系統側で事故が生じた場合の動特性について解析を行い、従来の超音速機の場合の解析結果<sup>3-5)</sup>や自励式インバータの場合の解析結果<sup>4,5)</sup>との比較をまじえながら考察を行う。さらに事故後の対策についても考察を行う。本章で取り扱う事故は、インバータにおける点弧失敗事故、交流系統の一線断線事故、交流系統の一線地絡事故の3種類である。

### § 3. 1 インバータの点弧失敗事故

インバータの点弧失敗事故の解析では、サイリスタの一つが何らかの原因により点弧しなくなった場合を想定する。

具体的には、1周期の定常運転の後、サイリスタ  $S_{01}$  を点弧させないことにより模擬した。

#### 3. 1. 1 結果及び考察

図3.1(a)は全12個のサイリスタの電流である。これらを見ると  $S_{01}$  が点弧失敗を起こすと同時に  $S_{05}$  は転流失敗に陥っている。この理由は他励式インバータの動作を考えれば明らかになる。すなわち他励式インバータでは、あるサイリスタ(この場合  $S_{01}$ )が点弧することにより、それに対応するサイリスタ ( $S_{05}$ )、及び変圧器巻線 ( $T_{01}$ 、 $T_{03}$ )、変圧器漏れインピーダンス ( $Z_{01}$ 、 $Z_{03}$ ) からなる閉ループが形成される。この時、点弧サイリスタ側の変圧器 ( $T_{01}$ ) の電圧がもう一方の変圧器 ( $T_{03}$ ) の電圧より小さければ消弧サイリスタ ( $S_{05}$ ) には逆電流が流れこのサイリスタの消弧が行われ転流が完了する。すなわち、サイリスタの消弧はそのサイリスタに対応するサイリスタの点弧によって為されるのである。そのため、いまの場合  $S_{01}$  の点弧失敗が  $S_{05}$  の転流失敗を引き起こしている。その結果、 $S_{01}$  に電流が流れなくなるのに対して  $S_{05}$  には電流が流れ続ける。さらに、 $S_{03}$  は点弧失

敗に陥っている。この理由も他励式インバータの動作を考えれば明らかになる。すなわち他励式インバータでは点弧角 $\alpha$ は $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ に設定されるが、このとき、正常な運転状態であれば、 $S_{03}$ が点弧すべき時刻に $S_{03}$ にかかる電圧は( $T_{01}$ の電圧 -  $T_{02}$ の電圧)となるはずであり、その値は正である。ところがいま、 $S_{05}$ が転流失敗に陥っているため $S_{03}$ にかかる電圧は( $T_{01}$ の電圧 -  $T_{03}$ の電圧)であり、その値は負である。そのため $S_{03}$ は点弧失敗に陥ってしまう。結局、MHD発電機負荷電流はすべて $S_{05}$ を流れることになる。しかしながら、上側インバータの事故は下側インバータの転流動作には悪影響を与えず下側インバータは正常に動作していることもわかる。

図3.1(b)、(c)、(d)はそれぞれMHD発電機負荷電流、MHD発電機チャンネル内電流密度 $y$ 方向成分 $J_y$ 、およびMHD発電機ダクト内流速分布である。事故後、 $S_{05}$ が転流失敗に陥ったため、負荷電流はすべて $S_{05}$ を流れ、 $S_{06}$ がON状態の時には上側ブリッジが完全に短絡状態となり最大値をとる。そのため負荷電流は基本周波数で変動する。負荷電流の最大値は事故発生前の負荷電流値の約125%である。そのとき $J_y$ は負荷電流の増大にもかかわらずその絶対値が減少する(これはダイアゴナル形MHD発電機とファラデー形MHD発電機の根本的な相違点である)。その結果、ナヴィエ・ストークス方程式(1.1.2)において流体にかかるブレーキを表す左辺第4項が減少し流体はチャンネル内で加速され、流れは亜音速から超音速になり衝撃波が発生する。衝撃波は下流に伝わってゆき、チャンネルからディフューザにかかる部分に流速がたいへん大きく(事故発生前の約2倍)なった部分ができる。その後、流速は負荷電流の変化に対応した変動を続けるが全体的には落ち着く。

図3.1(e)、(f)はそれぞれ同期発電機出力、回転子角偏差である。点弧失敗事故発生後、同期発電機出力は基本周波数の周期で定格出力の $\pm 10\%$ の幅で変動しながらゆるやかに変化する。まず、事故後150msぐらまでは増加するがその後は逆に減少している。それに対応して回転子は最初減速、その後加速に転じている。図3.1(g)、(h)、(i)はそれぞれ電機子巻線電流、d軸制動巻線電流、q軸制動巻線電流である。制動巻線電流の振幅がd軸、q軸共に事故以前に較べ激増していることから、回転子を動揺させる力がはたらいていることがわかる。回転子は動揺しながら新たな安定点に落ち着いてゆくと考えられる。つまり、同期発電機出力も30MWを中心に変動しながら

落ち着いてゆくであろう。しかし、インバータが点弧失敗（すなわち転流失敗）の状態にあるかぎり、基本周期の変動は続くであろう。

図3.1(j)、(k)はそれぞれa、b、c相送電線電流、上側変圧器一次側電流である。事故後、送電線電流には若干の非平衡状態がみられ、しかもその非平衡状態には回復の兆しはみられない。この非平衡状態においてはa相、b相電流は負の直流分がバイアスされた状態、c相電流は正の直流分がバイアスされた状態となる。なぜなら、事故後 $Z_{01}$ 、 $Z_{02}$ をインバータから変圧器に向かって電流が流れることはなく、逆に $Z_{03}$ を変圧器からインバータに向かって流れることもないため、変圧器一次側電流は図3.1(k)のようになるからである。しかし送電線電流への事故の影響は小さい。これは、図3.1(g)からもわかるように同期発電機からの電力がMHD発電機の電力に比べ大きく、しかも同期発電機の慣性定数が大きいことからその出力が安定しているためである。

自励式インバータシステムにおいてはインバータの点弧失敗事故はMHD発電機にとって開放事故であった<sup>4,5)</sup>が、以上述べてきたように他励式インバータシステムにおいては短絡事故である。そのため、MHD発電機内部では流速の増大がみられ、亜音速機の場合は超音速機の場合<sup>3)</sup>と異なり、衝撃波が発生してしまう。

ところでインバータの動作に関する考察から、転流失敗事故時のシステムの特性は点弧失敗事故時の特性とほとんど同じであると考えられる<sup>3)</sup>。したがって転流失敗事故時の特性解析は行わないことにする。

### 3. 1. 2 事故後の対策

3. 1. 1でも述べたように送電線電流に対する点弧失敗事故の影響はそれほど大きくない。そのため、事故後の対策として直流側を遮断することにより、同期発電機から無限大母線にいたる交流系統を再び正常な状態に復帰させることができると考えられる。これは直流側を切り捨てるということではなく、直流側にとっても有効な手段である。というのは、直流側の遮断はMHD発電機にとっては端子を開放することになるので、作動流体の速

度は急激に下がり、MHD発電機の暴走を防ぐことになり大事故の発生を回避することができると考えられるからである。その後、燃烧器等の調整により徐々に熱入力を減らしてMHD発電機を安全な状態へ移行させることが可能であると考えられる。

以上のような考察より、事故発生後ある時間を経た後、直流側を遮断した場合のシステムの特性解析を行うことにする。

具体的には3. 1. 1の計算結果からさらに2周期の継続計算の後、すなわち事故後22周期を経た時点で直流側を遮断する。遮断はMHD発電機とインバータの間の遮断器を作動させることにより模擬する。

図3.2(a)、(b)、(c)はそれぞれMHD発電機ダクト内流速分布、MHD発電機負荷電流、a、b、c相送電線電流である。流速は遮断直後の大きな変動を経て落ち着く。このとき衝撃波も消滅している。送電線電流は遮断後、その波高値は小さくなるが三相平衡状態に復帰している。

### § 3. 2 交流系統一線断線事故

交流系統の一線断線事故の解析では、送電線の一線が断線した場合を想定する。

具体的には、2周期の定常運転の後、送電線インピーダンス $Z_{i4}$ の抵抗分を大きくすることでa'相の断線を模擬する(図3.3を参照されたい)。

#### 3. 2. 1 結果及び考察

図3.4(a)、(b)、(c)はそれぞれMHD発電機負荷電流、MHD発電機チャンネル内電流密度y方向成分 $J_y$ 、MHD発電機ダクト内流速分布である。事故後、負荷電流はゆるやかに減少し続けている。計算を行った時間ではまだ安定していないが、その時間変化からは、事故後の変動のピークは過ぎ、まもなく安定するようと思われる。そのとき3. 1. 1の場合とは逆に $J_y$ は

その絶対値が増大し、流体にはブレーキがかかり流速はチャンネル内を中心に減少してゆく。

図3.4(d)、(e)はそれぞれサイリスタ  $S_{01}$ 、 $S_{02}$  の電流である。インバータは事故後も正常な動作を続けることがわかる。もちろんその時、各サイリスタを流れる電流は、MHD発電機負荷電流が減少することに対応してそれぞれ小さくなる。

図3.4(f)、(g)はそれぞれ同期発電機出力、回転子角偏差である。一線断線事故発生後、同期発電機出力は基本波の2倍の周期で振動しながらゆるやかに変動する。それに対応して回転子角偏差も変動する。やがて回転子は新しい安定点に落ち着くと思われる。

図3.4(h)、(i)はそれぞれa、b、c相およびa'、b'、c'相送電線電流である。事故後、断線したa'相に電流が流れなくなるのは当然であるがそれと同時にa相電流が約2倍に増大し2回線の電流和としてはあまり変化してない。しかしよくみるとa相電流も徐々に減少しておりMHD発電機負荷電流の減少が影響している。

このように事故の影響が比較的小さいのは、本解析で考えている回路の送電線が2回線であることによると考えられる。すなわち、本節の場合のように、たとえa'相が断線しても、もう一方の回線のa相により送電を続けることができるので事故の影響が小さいと考えられるのである。

以上述べてきたように、送電線が2回線のシステムにおいては交流系統一線断線事故の影響は小さいが、MHD発電機、同期発電機にとっては開放に向かう事故である。そのためMHD発電機負荷電流は大きく減少し、MHD発電機内部では流速の減少がみられる。しかし亜音速機の場合は超音速機の場合<sup>3-5)</sup>と異なり衝撃波は発生しない。

### 3. 2. 2 事故後の対策

以上述べてきたように、本解析では2回線の送電線を考えているので1線断線事故の影響はそれほど大きくない。MHD発電機内においても流速が減少するため衝撃波も発生していない。そのため断線事故を起こした送電

線を再投入することによりシステムを事故以前の状態に復帰させることができると考えられる。

以上のような考察より、事故発生後ある時間を経た時点で、送電線を再投入した場合のシステムの特性格解析を行うことにする。

具体的には、3. 2. 1の計算結果からさらに2周期の継続計算の後（すなわち事故後19周期を経た時点で）送電線を再投入する。再投入は、送電線インピーダンス $Z_{L4}$ の抵抗分を元の値に戻すことで模擬する。

図3.5(a)、(b)はそれぞれMHD発電機負荷電流、MHD発電機ダクト内流速分布である。MHD発電機負荷電流は一線断線事故後19周期を経てもまだ減少傾向にあるが、その変化はゆるやかになってきている。その時点で事故前の値の約65%に減少したMHD発電機負荷電流（そのとき電気出力は約64%）は、送電線の再投入後回復してゆくが、その変化はたいへんゆるやかで、再投入後16周期を経過してもその値は事故前の約75%に過ぎない（そのとき電気出力は約73%）。流速分布の時間変化からも回復がたいへんゆっくりしたものであることがわかる。

図3.5(c)、(d)はそれぞれ同期発電機出力、回転子角偏差である。同期発電機出力は再投入後はそれまでの大きな変動から脱する。しかしその後MHD発電機出力の増大に対応してゆるやかに減少する。そしてこの後、振動しながら事故前の値に落ち着いてゆくと考えられる。回転子角偏差をみても、再投入後16周期の時点で極小値を過ぎており、この後、事故前の値に落ち着いてゆくと考えられる。

図3.5(e)、(f)はそれぞれa、b、c相およびa'、b'、c'相送電線電流である。送電線電流は再投入後ただちに三相がつりあった状態に回復していることがわかる。

### § 3. 3 交流系統一線地絡事故

交流系統一線地絡事故の解析では、送電線の一線が地絡し、その後ある時間を経過した時点で事故相線路を遮断する場合を想定する。

具体的には、2周期の定常運転の後、短絡事故模擬用抵抗 $R_g$ を小さくすることでc相の地絡を模擬し、その状態で6周期<sup>20)</sup>計算した後、送電線 $Z_{L6}$ 、 $Z_{Lc}$ のインピーダンスの抵抗分を大きくすることで遮断を模擬する(図3.6を参照されたい)。

### 3. 3. 1 結果及び考察

図3.7(a)は全12個のサイリスタの電流である。事故後 $S_{01}$ 、 $S_{02}$ 、 $S_{03}$ 、 $S_{04}$ 、 $S_{09}$ 、 $S_{10}$ 、 $S_{11}$ 、 $S_{12}$ が点弧失敗、 $S_{05}$ 、 $S_{06}$ 、 $S_{07}$ 、 $S_{08}$ が転流失敗に陥る。このことは次のように理解できる。すなわち、地絡事故によりc相変圧器の電位が零になり、そのためc相の電位により消弧すべきサイリスタが消弧できなくなり転流失敗に陥る。上側変圧器では $S_{05}$ 、 $S_{06}$ がそのサイリスタにあたる。下側変圧器は $\Delta$ -Y結線のため少し複雑であるが $S_{07}$ 、 $S_{08}$ がそのサイリスタにあたる。結局、MHD発電機は $S_{01}$ 、 $S_{02}$ 、 $S_{07}$ 、 $S_{08}$ により短絡される。事故相送電線路遮断後は、インバータは正常な動作状態に復帰する。

図3.7(b)、(c)、(d)はそれぞれMHD発電機負荷電流、MHD発電機チャンネル内電流密度 $y$ 方向成分 $J_y$ 、MHD発電機ダクト内流速分布である。地絡事故発生後、MHD発電機負荷電流は急激に増大し、その後定常運転時より約30%大きい値に落ち着く。また事故相送電線路遮断後は、事故発生前の値よりやや(約3%)大きい値に戻り安定する。また事故後、3. 1. 1の場合と同じく $J_y$ はその絶対値が減少し、流体はチャンネル内で加速される。そして衝撃波が発生する。衝撃波は下流に伝わってゆき、ディフューザ内で落ち着く。その時、チャンネルからディフューザにかかる部分に流速がたいへん大きく(事故発生前の約2倍)なった部分ができる。事故相送電線路遮断後、流速は小さくなるが、安定した時点においても超音速流である部分が残り、計算を行った時間では衝撃波は消滅していない。

図3.7(e)、(f)はそれぞれ同期発電機出力、回転子角偏差である。地絡事故発生後、同期発電機出力は基本周期の2倍の周波数で大きく変動する。その振幅は $\pm 30\text{MW}$ 以上にも及ぶものである。回転子は減速しており、出力が平均として増大していることがわかる。事故相送電線路遮断後は、回転子は



加速しており出力が30MWより小さくなっていることになる。この後、回転子角は落ち着いてゆき、出力も30MWに落ち着いてゆくと考えられる。

図3.7(g)、(h)はそれぞれa、b、c相およびa'、b'、c'相送電線電流である。Z<sub>L6</sub>を流れる電流は当然のことながら事故後大きく増大し、事故相送電線路遮断後は零となる。もう一方の回線においては、地絡期間中は三相電流は非平衡状態に陥り、遮断後はc相の電流が増大した状態が続く。このようすは前節の一線断線事故時のようすと似ている。

交流系統の一線地絡事故時において、自励式インバータシステムの場合はその消弧能力が大きければ定常運転を持続できる<sup>4,5)</sup>のに対し、他励式インバータシステムにおいては本節における解析のように転流失敗に陥る。また、他励式インバータシステムにおいてインバータが転流失敗に陥るとMHD発電機にとっては短絡事故となるため、超音速機の場合<sup>3)</sup>と異なり亜音速機においては衝撃波が発生する。

## 第4章 シード率変化時の特性解析

第2章においても述べたように、前章までの解析においてはMHD発電機作動流体はシード率1.0%（重量比）の重油空気燃焼ガスであるとしていた。ところで実際の発電状況を考えると、そのシーディングに際して当然“揺らぎ”が発生すると思われ、それは導電率、ホール係数の変化として発電状態に影響を及ぼすと考えられる。また逆に、シード率を変化させることによって出力をある程度制御することができるであろう。さらには、本論文では取り扱わないが、シード率を変化させることによるMHD発電機の起動、停止への対応が考えられる。以上のような考え、展望から、動特性解析の一環としてシード率を変化させた場合の特性解析を行うことは非常に重要であると考えられる。本章では、シード率変化時の基礎的な特性解析を行う。

### § 4. 1 解析手法

本解析においては、第1章で用いた保存則(1.1.1)式～(1.1.3)式に加えて、シード物質の質量保存則を解く。シード物質の質量保存則の方程式は次のようなものである。

$$\frac{\partial}{\partial t} (s \rho A) + \frac{\partial}{\partial x} (s \rho u A) = 0 \quad (4.1.1)$$

ただし、 $s$ はシード率（重量比）である。また $\rho$ 、 $u$ 、 $A$ は(1.1.1)式～(1.1.4)式における変数と同一である。

さて、シード率 $s$ と、導電率 $\sigma$ 、ホール係数 $\beta$ の関係は、正確には燃焼の状態から計算しなくてはならないが、本解析においては、 $s$ の変化が小さいことから、付録1の(付1.5)式、(付1.6)式に対し、簡単に次のような関係が成り立つとして修正を施す。

$$\sigma \propto s^{0.5}$$

$$\beta \propto s^{0.0}$$

ここでは、シード率を図4.1(a)、(b)に示すように変化させた2つの場合について解析を行う。すなわち、ある期間シード率が増大した場合と、逆に減少した場合の2種類である。

## § 4. 2 解析結果

### 4. 2. 1 シード率増大時

ここでは、ノズル入口におけるシード率が図4.1(a)のように約100msの間、1.0%から1.1%に増大した場合を想定する。

図4.2(a)、(b)、(c)、(d)はそれぞれMHD発電機ダクト内流速分布、MHD発電機チャンネル内電流密度のy方向成分 $J_y$ 、MHD発電機負荷電流、MHD発電機出力である。ノズル入口でのシード率の変化は約1.9msでチャンネル入口に達し、シード率が増大することにより導電率が上がるので、 $J_y$ はその絶対値が増大する。そのためナビエ・ストークス方程式(1.1.2)において流体にかかるブレーキを表す左辺第4項が増大し流速は減少する。しかしここで注目すべき点として、ディフューザ入口付近では逆に流速が増大し、一時的にはあるが衝撃波が発生していることがあげられる。シード率増大期間中、負荷電流は減少しつづけ、計算を行った条件では定常値の約45%にまで減少する。その時出力も約44%にまで減少している。シード率回復に伴い、流速、負荷電流、出力とも増加するが、その変化は非常にゆるやかで、計算を行った時間ではまだ定常には達していない。

図4.2(e)、(f)はそれぞれ同期発電機出力、回転子角偏差である。シード率増大期間中、同期発電機出力は増加しつづけ、計算を行った条件では最大約0.14MW(同期発電機出力の約0.47%)増加する。これはMHD発電機出力の減少に対応している。しかし、その増加分はMHD発電機出力減少分の約1/5である。

図4.2(g)、(h)はそれぞれサイリスタ $S_{01}$ 、 $S_{03}$ 、 $S_{05}$ の電流波形、a、b、c相送電線電流である。この程度のシード率の増大はインバータの

動作には影響がないことがわかる。また、送電線電流の変化も小さい。

以上の結果、考察から以下のようなことがわかる。すなわち、10%のシード率増大が100ms程度続く状況においては、インバータの動作には異常はみられず、また同期発電機出力などが大きな影響を受けることもない。しかし解析を行ったMHD発電機では、そのダクト内部において流速の減少がみられ、シード率が戻った後の回復にはたいへん時間がかかる。また逆に衝撃波の発生も確認され、シード率増大はMHD発電機にとって好ましい状況ではない。

#### 4. 2. 2 シード率減少時

ここでは、ノズル入口におけるシード率が図4.1(b)のように約100msの間、1.0%から0.8%に減少した場合を想定する。

図4.3(a)、(b)、(c)、(d)はそれぞれMHD発電機ダクト内流速分布、MHD発電機チャンネル内電流密度のy方向成分 $J_y$ 、MHD発電機負荷電流、MHD発電機出力である。ノズル入口でのシード率の変化は約1.9msでチャンネル入口に達し、シード率が減少することにより導電率が下がるので、 $J_y$ はその絶対値が減少する。そのためナビエ・ストークス方程式(1.1.2)において流体にかかるブレーキを表す左辺第4項が減少し流速は増大する。その結果、チャンネル後部において衝撃波が発生し、その後は点弧失敗事故や一線地絡事故の時のような変化をする。すなわち、チャンネル後部で発生した衝撃波は下流に移動し、ディフューザ内部で落ち着く。シード率減少期間中、負荷電流は約11%減少する。その時出力も約12%減少している。シード率回復後、流速は減少するが衝撃波は消滅しない。また負荷電流、出力はシード率減少前の値よりやや(0.5MW)大きい値に戻る。シード率回復に伴う負荷電流、出力、流速の回復は、4. 1. 1のシード率減少時と比較してたいへん速やかである。たとえば図4.3(c)からは負荷電流はシード率の変化にほとんど追従して変化している。

図4.3(e)、(f)はそれぞれ同期発電機出力、回転子角偏差である。シ

ード率減少期間中、同期発電機出力は約0.4MW（同期発電機出力の約0.13%）増大する。これはMHD発電機出力の減少に対応している。しかし、その増加分はMHD発電機出力減少分の約1/5である。

図4.2(g)、(h)はそれぞれサイリスタ $S_{01}$ 、 $S_{03}$ 、 $S_{05}$ の電流波形、a、b、c相送電線電流である。この程度のシード率の減少はインバータの動作には影響がないことがわかる。また、送電線電流の変化も小さい。

以上の結果、考察から以下のようなことがわかる。すなわち、20%のシード率減少が100ms程度続く状況においては、インバータの動作には異常はみられず、また同期発電機出力などが大きな影響を受けることもない。しかし解析を行ったMHD発電機では、そのダクト内部において衝撃波が発生し、しかもその衝撃波はシード率回復後も消滅しにくい。シード率減少はMHD発電機にとって避けなければならないことがらである。

なお、本解析においてはシード率増大、減少どちらの場合にもMHD発電機負荷電流、MHD発電機出力は減少した。

本研究においては、わが国における次期パイロットプラントの規格と想定される熱入力100MW級MHD-汽力発電結合システムに関する研究の一部として、電気出力13MWの単一負荷亜音速ダイアゴナル形MHD発電機の出電力を、他励式インバータを介して30MW級同期発電機の出電力と並列に無限大母線に供給するシステムに関する、定常運転時、事故時、シード率変化時の特性解析を行った。そして、事故時については、超音速機との比較、自励式インバータシステムとの比較を行った。

## I. 定常運転時の特性について

定常運転時においても、MHD発電機はインバータの動作により過渡状態の連続になるが、そのような条件においてもMHD発電機は安定した運転をすることができる。

本研究で解析を行ったシステムにおいては、送電線電流の高調波は十分抑えられている。

本システムでは受電端において高力率が実現されており、力率をさらに上げることが目的ならば調相器のキャパシタンスはさらに小さな値でよいことになり、結局、遅れ力率で運転中の同期発電機と他励式インバータは無効電力のやりとりという点で相性がよいと言える。

## II. 事故時の特性について

他励式インバータシステムは自己消弧能力を持たないために、自励式インバータシステムと比較した場合、直流側にとって短絡傾向となる事故が多い（インバータの点弧失敗事故、交流系統一線地絡事故）。また、短絡（過負荷）状態において亜音速MHD発電機は超音速MHD発電機と異なり、その内部において衝撃波が発生する危険が大きい。そして衝撃波が発生した場合は、直流側遮断というような措置によりMHD発電機を安定させてから再起動することが必要になる。

また超音速MHD発電機の場合と異なり亜音速MHD発電機においては、流速の減少により衝撃波が発生することはないが、一度減少した流速はその回復にかなりの時間を要する。

### Ⅲ. シード率変化時の特性について

約100msにわたりシード率が定常状態の10%増大、または20%減少する状況においては、その影響はインバータ動作の異常を引き起こすほどではない。しかし、MHD発電機内部においてはシード率減少時にはもちろん、増大時においても衝撃波の発生がみとめられる。安定したシーディングは非常に重要な課題である。

MHD発電機の時定数が非常に小さいにも関わらず非定常時に系統側が比較的安定しているのは、同期発電機の大きい時定数のためである。このことと、さきに述べたインバータの無効電力という点の両面から考えて結局、MHD発電機にとって同期発電機との並列運転は非常に有効であると言える。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、広い心で終始懇切丁寧な御指導をしてくださいました卯本重郎教授に厚く御礼申し上げます。

日々の研究過程において常に適切な指針を与え続けてくださいました石川本雄助教授に深く感謝いたします。

貴重な御時間を削いてまで親切に御指導くださり温かく見守ってくださいました神戸市立工業高等専門学校の前ノ瀬信彦助教授に深く感謝いたします。

数多くの有益な御助言を与えてくださり、日々の生活において励まし続けてくださいました安藤詔生助手、乾 義尚助手に深く感謝いたします。

電力系統についての数々の疑問に明快な回答を与えてくださいました林研究室の垣本直人講師、三菱電機株式会社の伊予田 功氏に深く感謝いたします。

最後に、五回生の吉村竜一氏をはじめとする卯本研究室の皆様にも深く感謝いたします。



## 参考文献

- 1) 玉置琢磨、萩原宏康; MHD発電(総合科学出版、1967)
- 2) 藤本武助; 流体力学入門(養賢堂、1976)
- 3) 田村市朗; 一機無限大系統に接続したMHD発電機-インバータシステムの特性解析(1987、修士論文)
- 4) 草間章; 交流系統に接続した接続したMHD発電機・自励式インバータシステムの特性解析(1985、特別研究報告)
- 5) 三好誠司; 交流系統に接続した接続したMHD発電機-自励式インバータシステムの特性解析(1986、特別研究報告)
- 6) Motoo Ishikawa ; Unsteady Phenomena in High-Interaction MHD Generators , Technical Report of the Institute of Atomic Energy , Kyoto University No.192 (1982)
- 7) B.Carnahan , H.A.Luther , J.O.Wilkes (藤田 宏、他訳); 計算機による数値計算法(日本コンピュータ協会、1982)、 p.611
- 8) R.J.Roache(高橋亮一、他訳); コンピュータによる流体力学・下(構造計画研究所、1976)、 p.70
- 9) 卯本重郎; 電磁気学(昭晃堂、1975)、 p.257
- 10) 石川、卯本; 熱入力100MW級 電気出力10MW級MHD発電機 の概念設計、昭和59年電気学会関西支部連合大会 G1-50
- 11) 小田荘一; 同期機の二反作用理論と単位法
- 12) 平山勝己; サイリスタとパワーエレクトロニクス(技術評論社、1979)
- 13) 西村正太郎、丸橋 徹、岡田隆夫、村上吉繁; 現代電気機器学(オーム社、1982)
- 14) 今井孝二; パワエレクトロニクス(電気書院、1977)
- 15) 小津厚二郎; サイリスタの基礎と応用(オーム社、1978)
- 16) 小津厚二郎、横田博; サイリスタの応用(産報、1970)
- 17) 山本昌、西村正太郎; サイリスタ実用便覧(オーム社、1978)、 p.138
- 18) 小沢孝夫; 電気回路II(昭晃堂、1980)
- 19) 服部嘉夫、小沢孝夫; グラフ理論解説(昭晃堂、1974)
- 20) 藤高周平、他5名; 電気機器IV(オーム社、1963)、 p.20
- 21) H.Schlichting ; Boundary Layer Theory (McGrow Hill,1968),p.612

- 22) Technical Report of the Investigation Committee of MHD Generator Plant in Japan (1973)
- 23) 三菱電機株式会社提供レポート
- 24) M.E.White , J.D.Anderson ; AIAA/ASME 3rd Joint Thermophysics et al. Conference , AIAA-82-0992(1982).
- 25) M.C.Cline ; Los Alamos Scientific Laboratory Report , LA-7326(1978).

なお、21)～25)は付録における参考文献である。

## 付録1 諸量について

### § 付 1. 1 M H D 発 電 機 に 関 す る 諸 量

(a) 損失項について<sup>21)</sup>

摩擦損失  $f$  は平板乱流に対して得られる値の2倍であると仮定する。

$$f = 2 \times 2 D \rho u^2 c_f \quad (\text{付 1.1})$$

$$c_f = \left\{ 2.87 + 1.58 \log \left( \frac{x^*}{k_s} \right) \right\}^{-2.5}$$

$$x^* = 1 + x$$

$$k_s = 0.003$$

$$D = \sqrt{A}$$

熱損失は、伝導による損失と放射による損失の和であり、伝導による損失については平板乱流に対して得られる値の2倍であると仮定する。

$$q = q_t + q_r \quad (\text{付 1.2})$$

$$q_t = 2 \times 2 D \rho u C_p c_f (T_0 - T_w) \quad (\text{付 1.3})$$

$$q_r = 4 D \sigma_B C_r (T^4 - T_w^4) \quad (\text{付 1.4})$$

$$\sigma_B = 5.66 \times 10^{-8}$$

$$C_r = 0.20$$

ここで、  
 $c_f$ : 摩擦係数  
 $k_s$ : 等価砂粒径  
 $T_0$ : 淀み点温度  
 $C_p$ : 定圧比熱  
 $\sigma_B$ : Stefan-Bolzman定数  
 $q_t$ : 伝導による熱損失  
 $q_r$ : 放射による熱損失  
 $T$ : ガス温度  
 $T_w$ : 壁温

(b) 導電率  $\sigma$ 、ホール係数  $\beta$ 、エンタルピー  $h$ 、気体定数  $R$ 、比熱比  $\gamma$  について

第4章を除き、本研究では作動ガスとして  $K_2SO_4$  を1.0% (重量比) シードした重油空気燃焼ガスを用いる。 $\sigma$ 、 $\beta$ 、 $h$ 、 $R$ 、 $\gamma$  は圧力  $p$ 、温度  $T$

の関数であるが、近似的に次式によって表されることが報告されている<sup>22)</sup>。

$$\sigma = c p^m T^n \exp\left(-\frac{T_i}{T}\right) \quad (\text{付 1.5})$$

$$c = 8.99 \times 10$$

$$m = -5.10 \times 10^{-1}$$

$$n = 1.055$$

$$T_i = 2.5191 \times 10^4$$

$$\beta = c' B p^{m'} T^{n'} \quad (\text{付 1.6})$$

$$c' = 4.43 \times 10^{-4}$$

$$m' = -9.04 \times 10^{-1}$$

$$n' = 9.17 \times 10^{-1}$$

$$h = C_{H1} + C_{H2} T \quad (\text{付 1.7})$$

$$C_{H1} = -3.34 \times 10^6$$

$$C_{H2} = 2.804 \times 10^3$$

$$R = C_{R1} + C_{R2} T \quad (\text{付 1.8})$$

$$C_{R1} = 2.4191 \times 10^2$$

$$C_{R2} = 1.872 \times 10^{-2}$$

$$\gamma = C_{G1}(1 + C_{G2} T) \quad (\text{付 1.9})$$

$$C_{G1} = 1.0974$$

$$C_{G2} = 1.4654 \times 10^{-5}$$

### (c) 流速、圧力、温度の計算

(1.1.13)式で求めたUを用いて作動流体の速度u、圧力p、温度Tは次のように求まる。

$$u \rightarrow \frac{\rho u A}{\rho A} \quad (\text{付 1.10})$$

$$\varepsilon \rightarrow \frac{\rho \left( \varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) A}{\rho A} - \frac{u^2}{2} \quad (\text{付 1.11})$$

また、 $h = \varepsilon + p v$  ( $v$ : 体積)  $= \varepsilon + R T = \gamma \varepsilon$  だから(付1.7)式、(付1.9)式とから、

$$T \rightarrow \frac{C_{G1} \times e - C_{HH1}}{C_{HH2} - C_{G1} \times C_{G2} \times e} \quad (\text{付1.12})$$

$$p \rightarrow \rho R T \quad (\text{付1.13})$$

### § 付 1. 2 同期発電機に関する諸量

本研究で用いた同期発電機は参考文献23を基に設計した。その定格出力は 37,500 kVA、30,000 kW、力率は 0.8、端子電圧は線間電圧で 13,800 V、3相60Hzで回転数は 3,600 rpmである。

機械入力は 30,000 kWである。電機子巻線巻数  $N_a$ 、界磁巻線巻数  $N_f$ 、 $d$  軸、 $q$  軸制動巻線巻数  $N_d$ 、 $N_q$  の比は、

$$\frac{N_a}{N_f} = 0.078$$

$$\frac{N_a}{N_d} = 1.44$$

$$\frac{N_a}{N_q} = 2.87$$

と計算した。

本文 1. 2. 4 における同期発電機のリアクタンス及び巻線抵抗(単位法諸量)は参考文献23を参考にして以下のように定めた。

$$\begin{aligned} X_d &= 2.104 \\ X_q &= 2.002 \\ X_0 &= 0.176 \\ X_{ad} &= 1.928 \\ X_{aq} &= 1.826 \\ X_{1f} &= 0.168 \\ X_{1Dd} &= 0.022 \\ X_{1Dq} &= 0.021 \\ X_{1fd} &= X_{ad} + X_{1f} \end{aligned}$$

$$X_{DDd} = X_{ad} + X_{lDd}$$

$$X_{DDq} = X_{ad} + X_{lDq}$$

$$r_a = 0.0158$$

$$r_f = 0.00123$$

$$r_{Dd} = 0.0245$$

$$r_{Dq} = 0.0653$$

ただし、 $x_{lr}$  は界磁漏洩リアクタンス、 $x_{lDd}$  は d 軸制動巻線漏洩リアクタンス、 $x_{lDq}$  は q 軸制動巻線漏洩リアクタンスである。

また界磁電圧は、

$$V_f = 250 \text{ V} = 0.00173 \text{ p.u.}$$

電機子巻線回路、界磁巻線回路、d 軸、q 軸制動巻線回路の時定数はそれぞれ、

$$T_a = 0.24 \text{ s}$$

$$T_f = 4.54 \text{ s}$$

$$T_{Dd} = 0.21 \text{ s}$$

$$T_{Dq} = 0.075 \text{ s}$$

となる。

機械の慣性定数は、

$$H = 3 \text{ s}$$

である。

### § 付 1. 3 電力系統に関する諸量

図 1.2 に示した回路における各素子のはたらきについて、以下に簡単に説明する。

M H D : M H D 発電機

$Z_0$  : 直流リアクトル

$S_{01} \sim S_{12}$  : サイリスタ

$Z_{01} \sim Z_{12}$  : インバータ側変圧器漏洩インピーダンス

$T_{01} \sim T_{12}$  : インバータ側変圧器

$E_{S1} \sim E_{S3}$  : 同期発電機  
 $Z_{S1} \sim Z_{S6}$  : 同期発電機側変圧器漏洩インピーダンス  
 $T_{S1} \sim T_{S6}$  : 同期発電機側変圧器  
 $Z_{L1} \sim Z_{L6}$  : 送電線インピーダンス  
 $Z_{F1} \sim Z_{F6}$  : 高調波除去フィルター (抵抗、リアクトル)  
 $C_{F1} \sim C_{F6}$  : 高調波除去フィルター (キャパシタンス)  
 $Z_{C1} \sim Z_{C3}$  : 調相器 (抵抗、リアクトル)  
 $C_{C1} \sim C_{C3}$  : 調相器 (キャパシタンス)  
 $Z_{13} \sim Z_{15}$  : 無限大母線側変圧器漏洩リアクタンス  
 $E_1 \sim E_3$  : 三相平衡無限大母線  
 $R_{S1}$ 、 $R_{S2}$ 、 $R_G$  : 短絡事故模擬用抵抗  
 $R_{SG}$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_{F1}$ 、 $R_{F2}$ 、 $R_C$  : 接地抵抗

次に、この回路の諸量を挙げる。

$Z_U$  : 100 mH  
 $S_{01} \sim S_{12}$  : 0.01  $\Omega$  (導通時)、 $10^7 \Omega$  (遮断時)  
 $Z_{01} \sim Z_{12}$  : 6.534  $\Omega$ 、36.65 mH (2次側換算値)  
 $Z_{S1} \sim Z_{S6}$  : 2.178  $\Omega$ 、28.88 mH (2次側換算値)  
 $Z_{L1} \sim Z_{L6}$  : 1.2  $\Omega$ 、12.5 mH (0.12  $\Omega$ /km、1.25 mH/kmの10km分)  
 (ただし、交流系統1線断線事故時の $Z_{L6}$ は $1.2 \times 10^8 \Omega$ )  
 $Z_{F1} \sim Z_{F3}$  : 4.221  $\Omega$ 、50.893 mH  
 $Z_{F4} \sim Z_{F6}$  : 3.572  $\Omega$ 、36.438 mH  
 $C_{F1} \sim C_{F6}$  : 1.1426  $\mu$ F  
 $Z_{C1} \sim Z_{C3}$  : 5.804  $\Omega$ 、192.43 mH  
 $C_{C1} \sim C_{C3}$  : 2.2853  $\mu$ F  
 $Z_{13} \sim Z_{15}$  : 6.534  $\Omega$ 、36.65 mH  
 $E_1 \sim E_3$  : 66,000 V  
 $R_{S1}$ 、 $R_{S2}$ 、 $R_G$  :  $10^6 \Omega$  (平常時)、 $10^{-4} \Omega$  (事故時)  
 $R_{SG}$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_{F1}$ 、 $R_{F2}$ 、 $R_C$  : 300  $\Omega$

インバータ側変圧器変圧比:15.064、同期発電機側変圧器変圧比:4.78

## 付録2 人工粘性項について

MHD発電機における流体力学的諸量に関する方程式(1.1.1)式～(1.1.3)式をマコーマック法により解く際、数値的安定性を得るため人工粘性項を加えている<sup>24,25)</sup>。(1.1.1)式～(1.1.3)式に対する人工粘性項はそれぞれ次のように与えられる。

$$\frac{C_1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_a \frac{\partial}{\partial x} (\rho A) \right\} \quad (\text{付2.1})$$

$$C_2 \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_a \frac{\partial}{\partial x} (u A) \right\} \quad (\text{付2.2})$$

$$C_3 \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_a \frac{\partial}{\partial x} (h A) \right\} \quad (\text{付2.3})$$

ただし、(付2.1)式～(付2.3)式において

$$\mu_a = \rho \Delta x \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|$$

$$C_1 = 0.24$$

$$C_2 = 0.40$$

$$C_3 = 0.40$$





## 付録4 回路網の解析手法

ここでは、本研究における回路網計算に用いた解析手法を一般的な形で述べる<sup>15, 16)</sup>。

まず、回路網の状態方程式の構成にあたって、基準木と補木を決める。基準木の選択は以下の規則に従って行うものとする。

- 1) 電圧源、キャパシタンス、コンダクタンスは必ず基準木に選ぶ。
- 2) 電流源は必ず補木に選ぶ。
- 3) 変圧器については、一次側と二次側で対応する巻線は、どちらか片方だけを基準木となるように選ぶ。

その結果、補木及び基準木はそれぞれ以下のような構成となる。

補木	電流源である枝の集合	$g$
	インダクタンスと抵抗を含む枝の集合	$x$
	変圧器の巻線である枝の集合	$l$
基準木	電圧源である枝の集合	$v$
	インダクタンスと抵抗を含む枝の集合	$y$
	キャパシタンスとコンダクタンスを含む枝の集合	$c$
	変圧器の巻線である枝の集合	$t$

枝集合を表すこれらの文字  $g$ 、 $x$ 、 $l$ 、 $v$ 、 $y$ 、 $c$ 、 $t$  は、以下の記述において行列やベクトルの添え字に使うことにする。

このようにして選んだ基準木と補木の枝に枝方向を決め、それを基にタイセット行列主要部  $F$  を作る。いま、 $x$  に含まれる枝数を  $n_x$  のように表すと、 $F$  は  $(n_g + n_x + n_l)$  行  $(n_v + n_y + n_c + n_t)$  列の行列である。そこで、 $F$  を12個の部分に分け次のように表す。

$$F = \begin{bmatrix} F_{gv} & F_{gy} & F_{gc} & F_{gt} \\ F_{xv} & F_{xy} & F_{xc} & F_{xt} \\ F_{lv} & F_{ly} & F_{lc} & F_{lt} \end{bmatrix}$$

なお、この文章においては、 $F$ 、 $B$ 、 $Q$ などの太字は、行列やベクトルを表すものとする。また、 $0$ は零行列、 $U$ は単位行列を表すものとする。

ある枝集合  $b$  に含まれる枝の各枝電圧を、列ベクトルとして  $v_b$  で表すとすると、回路

網のタイセット方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} & F_{gv} & F_{gy} & F_{gc} & F_{gt} \\ U & F_{xv} & F_{xy} & F_{xc} & F_{xt} \\ & F_{lv} & F_{ly} & F_{lc} & F_{lt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_g \\ v_x \\ v_l \\ v_v \\ v_y \\ v_c \\ v_t \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{付4.1})$$

(付4.1)を、 $v_g$ を含むもの、 $v_x$ を含むもの、及び $v_l$ を含むものに分けると以下の2式を得る。

$$v_{gt} + F_{xv} v_v + F_{xy} v_y + F_{xc} v_c + F_{xt} v_t = 0 \quad (\text{付4.2a})$$

$$v_{xt} + F_{xv} v_v + F_{xy} v_y + F_{xc} v_c + F_{xt} v_t = 0 \quad (\text{付4.2b})$$

$$v_{lt} + F_{lv} v_v + F_{ly} v_y + F_{lc} v_c + F_{lt} v_t = 0 \quad (\text{付4.2c})$$

(式4.2c)を変形すると、次式を得る。

$$F_{lt} v_t + v_l = - (F_{lv} v_v + F_{ly} v_y + F_{lc} v_c) \quad (\text{付4.3})$$

変圧比より導かれる行列Kを考えると、

$$v_l = K v_t \quad (\text{付4.4})$$

なる関係が成立する。(付4.4)を(付4.3)に代入すると、次式を得る。

$$v_t = -F_1 (F_{lv} v_v + F_{ly} v_y + F_{lc} v_c) \quad (\text{付4.5})$$

$$\text{ただし、 } F_1 = (F_{lt} + K)^{-1}$$

(付4.5)を(付4.2b)に代入し、 $v_v$ は既知であるから移項すると、次式のように表せる。

$$v_{xt} + B_{xy} v_y + B_{xc} v_c = B_{xv} v_v \quad (\text{付4.6})$$

$$\text{ただし、 } B_{xy} = F_{xy} - F_{xt} F_1 F_{ly}$$

$$B_{xc} = F_{xc} - F_{xt} F_1 F_{lc}$$

$$B_{xv} = F_{xv} - F_{xt} F_1 F_{lv}$$

(付4.6)を書き換えると、

$$\begin{bmatrix} U & B_{xy} & B_{xc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_c \end{bmatrix} = B_{xv} v_v \quad (\text{付4.7})$$

なる、KVLを表す式を得る

一方、カットセット行列主要部は、 $-F^t$ である。前述の枝電圧ベクトルと同様に、枝電流を列ベクトルで表すと、回路網のカットセット方程式は次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} -F_{v_0} & -F_{v_x} & -F_{v_l} \\ -F_{y_0} & -F_{y_x} & -F_{y_l} \\ -F_{c_0} & -F_{c_x} & -F_{c_l} \\ -F_{t_0} & -F_{t_x} & -F_{t_l} \end{bmatrix} \mathbf{U} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_0 \\ \mathbf{i}_x \\ \mathbf{i}_l \\ \mathbf{i}_v \\ \mathbf{i}_y \\ \mathbf{i}_c \\ \mathbf{i}_t \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (\text{付4.8})$$

(ただし、 $F_{v_x} = F_{xv}$ などの表記法を用いた)

(付4.8)を、 $\mathbf{i}_v$ を含むもの、 $\mathbf{i}_y$ を含むもの、 $\mathbf{i}_c$ を含むもの、及び $\mathbf{i}_t$ を含むものに分けると以下の4式を得る。

$$-F_{v_x} \mathbf{i}_x - F_{v_l} \mathbf{i}_l + \mathbf{i}_v = F_{v_0} \mathbf{i}_0 \quad (\text{付4.9a})$$

$$-F_{y_x} \mathbf{i}_x - F_{y_l} \mathbf{i}_l + \mathbf{i}_y = F_{y_0} \mathbf{i}_0 \quad (\text{付4.9b})$$

$$-F_{c_x} \mathbf{i}_x - F_{c_l} \mathbf{i}_l + \mathbf{i}_c = F_{c_0} \mathbf{i}_0 \quad (\text{付4.9c})$$

$$-F_{t_x} \mathbf{i}_x - F_{t_l} \mathbf{i}_l + \mathbf{i}_t = F_{t_0} \mathbf{i}_0 \quad (\text{付4.9d})$$

前述の行列 $\mathbf{K}$ を用いると、

$$\mathbf{i}_t = -\mathbf{K} \mathbf{i}_l \quad (\text{付4.10})$$

なる関係が成立する。(付4.10)を(付4.9d)に代入すると、次式を得る。

$$\mathbf{i}_l = -\mathbf{F}_2 (\mathbf{F}_{t_x} \mathbf{i}_x + \mathbf{F}_{t_0} \mathbf{i}_0) \quad (\text{付4.11})$$

ただし、 $\mathbf{F}_2 = (\mathbf{F}_{t_l} + \mathbf{K})^{-1}$

(付4.11)を、(付4.9b)、(付4.9c)に代入すると、計算に必要なだけの、 $\mathbf{KCL}$ を表す方程式(付4.12)及び(付4.13)を得る。

$$\mathbf{Q}_{y_x} \mathbf{i}_x + \mathbf{i}_y = -\mathbf{Q}_{y_0} \mathbf{i}_0 \quad (\text{付4.12})$$

$$\mathbf{Q}_{c_x} \mathbf{i}_x + \mathbf{i}_c = -\mathbf{Q}_{c_0} \mathbf{i}_0 \quad (\text{付4.13})$$

ただし、 $\mathbf{Q}_{y_x} = -\mathbf{F}_{y_x} + \mathbf{F}_{y_l} \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_{t_x}$

$\mathbf{Q}_{c_x} = -\mathbf{F}_{c_x} + \mathbf{F}_{c_l} \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_{t_x}$

$\mathbf{Q}_{y_0} = -\mathbf{F}_{y_0} + \mathbf{F}_{y_l} \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_{t_0}$

$\mathbf{Q}_{c_0} = -\mathbf{F}_{c_0} + \mathbf{F}_{c_l} \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_{t_0}$

(付4.12)と(付4.13)をまとめると、次式のように表せる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{y_x} \\ \mathbf{Q}_{c_x} \end{bmatrix} \mathbf{U} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_x \\ \mathbf{i}_y \\ \mathbf{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{Q}_{y_0} \\ -\mathbf{Q}_{c_0} \end{bmatrix} \mathbf{i}_0 \quad (\text{付4.14})$$

次に、各枝の素子定数から以下の3式を得る。

$$v_x + \left( L_x \frac{d}{dt} + R_x \right) i_x = 0 \quad (\text{付4.15})$$

$$v_y + \left( L_y \frac{d}{dt} + R_y \right) i_y = 0 \quad (\text{付4.16})$$

$$i_c + \left( C_c \frac{d}{dt} + G_c \right) v_c = 0 \quad (\text{付4.17})$$

行列  $L$ 、 $R$ 、 $C$ 、 $G$  はそれぞれ各枝のインダクタンス、抵抗、キャパシタンス、コンダクタンスの値を対角線上に並べた、対角行列である。

(付4.15)、(付4.16)、(付4.17)より次式を得る。

$$\left\{ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_y & 0 \\ 0 & 0 & -C_c & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U & 0 & -R_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_y & 0 \\ 0 & 0 & -G_c & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_c \\ i_x \\ i_y \\ i_c \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{付4.18})$$

(付4.7)、(付4.14)及び(付4.18)をひとつにまとめると、枝集合  $x$ 、 $y$ 、 $c$  に含まれる各枝の枝電圧と枝電流を状態変数とする状態方程式が、

$$\left\{ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_y & 0 \\ 0 & 0 & -C_c & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U B_{xy} B_{xc} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{yx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{cy} & 0 & 0 \\ U & 0 & -R_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_y & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_c \\ i_x \\ i_y \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xy} v_y \\ -Q_{yx} i_c \\ -Q_{cy} i_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{付4.19})$$

なる、 $\{2 \times (n_x + n_y + n_c)\}$  元一階常微分方程式として表せる。

ここで、(付4.19)を次のように書き換える。

$$A \frac{dx}{dt} + Bx = d \quad (\text{付4.20})$$

ただし、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 & \circ & & \circ & & \\
 & & \circ & -L_x & & \circ \\
 & \circ & & \circ & -L_y & \\
 \circ & \circ & -C_c & \circ & & \circ
 \end{bmatrix}
 \quad
 \mathbf{x} = \begin{bmatrix}
 \mathbf{v}_x \\
 \mathbf{v}_y \\
 \mathbf{v}_c \\
 \mathbf{i}_x \\
 \mathbf{i}_y \\
 \mathbf{i}_c
 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix}
 U B_{xy} B_{xc} & \circ & \circ & \circ & & \\
 \circ & \circ & Q_{yx} & & U & \\
 \circ & \circ & Q_{cy} & & & \\
 & U & \circ & -R_x & & \circ \\
 & & \circ & & -R_y & \\
 \circ & \circ & -G_c & \circ & & \circ
 \end{bmatrix}
 \quad
 \mathbf{d} = \begin{bmatrix}
 B_{xy} \mathbf{v}_y \\
 -Q_{yx} \mathbf{i}_c \\
 -Q_{cy} \mathbf{i}_c \\
 \circ \\
 \circ \\
 \circ
 \end{bmatrix}$$

(付4.20)を差分式に書き表すと、

$$\mathbf{A} \frac{\mathbf{x}_{(n)} - \mathbf{x}_{(n-1)}}{\Delta t} + \mathbf{B} \mathbf{x}_{(n)} = \mathbf{d}_{(n)} \quad (\text{付4.21})$$

となる。ただし、 $\mathbf{x}_{(n)}$ 、 $\mathbf{d}_{(n)}$ は、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{d}$ の $t=n \Delta t$ における値である。

$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{A}}{\Delta t} + \mathbf{B}$ なる行列を用いると、(付4.21)は次式のように表せる。

$$\mathbf{x}_{(n)} = \mathbf{A}^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{A}}{\Delta t} \mathbf{x}_{(n-1)} + \mathbf{d}_{(n)} \right\} \quad (\text{付4.22})$$

ベクトル $\mathbf{d}_{(n)}$ は、ベクトル $\mathbf{v}_v$ 、 $\mathbf{i}_c$ から独立に求めることができる。

よって、上式(付4.22)を用いて、 $\mathbf{x}_{(n)}$ を求めることができる。

## 付録5 電力系統と同期発電機の接続を表す行列

$$A_t = \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{c} \frac{A_p}{\Delta t_p} \end{array} \right] \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \left[ \begin{array}{c} \frac{A_s}{\Delta t_s} \end{array} \right] \end{bmatrix}$$

$$B_t = \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{c} B_p \end{array} \right] & \begin{array}{c} Q_{vo} \\ Q_{co} \end{array} \\ \\ \\ P/Ean & \begin{array}{c} -U \\ -U \\ -U \end{array} & \begin{array}{c} P^{-1} \cdot Ian \\ \\ \left[ \begin{array}{c} B_s \end{array} \right] \end{array} \end{bmatrix}$$

$$X_t = \left[ \left[ \begin{array}{c} X_p \end{array} \right] \quad i \ abc \quad v \ dqo \quad \left[ \begin{array}{c} X_s \end{array} \right] \right]^t$$

$$C_t = \left[ \left[ \begin{array}{c} B_{xv} \ v \ v \quad 0 \end{array} \right] \quad 0 \quad 0 \quad \left[ \begin{array}{c} C_s' \end{array} \right] \right]^t$$

( $C_s'$  は  $C_s$  の最初の3つの要素を零にした配列)

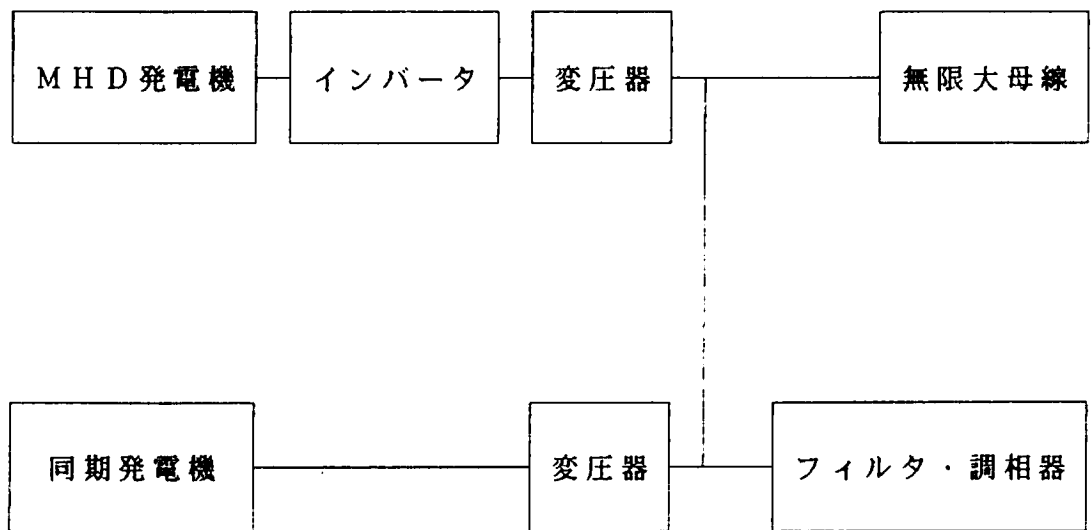


図 1.1 システムのブロック図





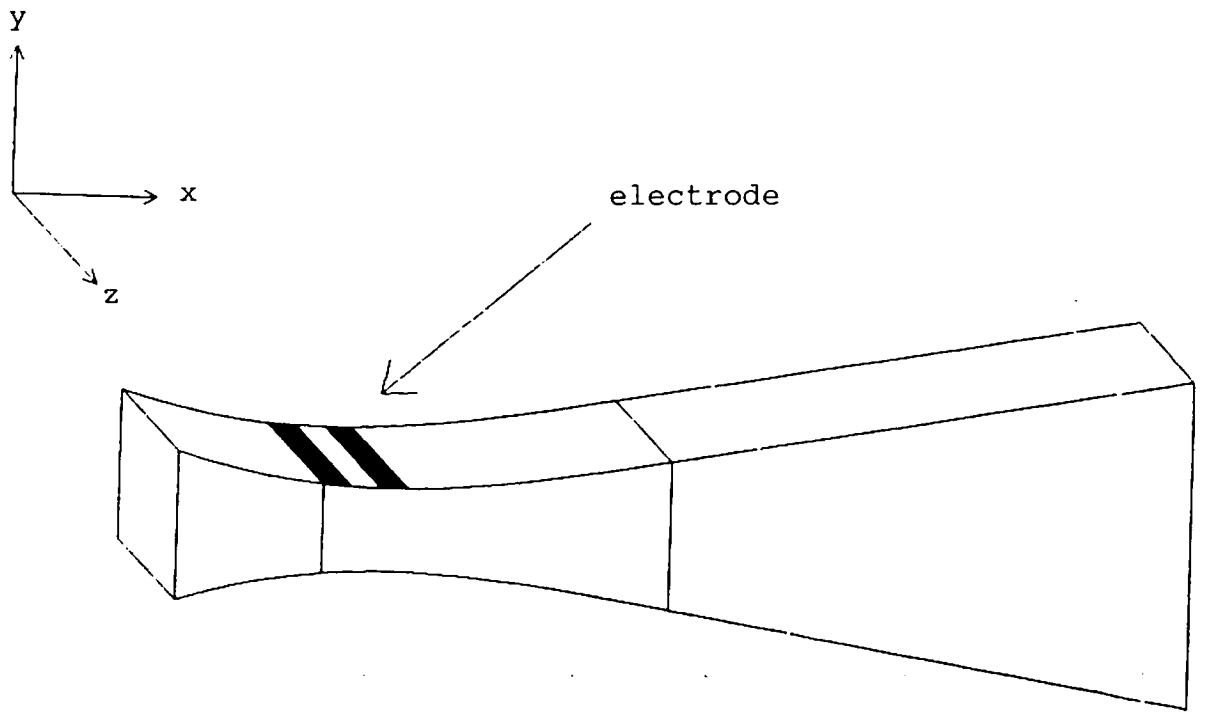


图 1. 3 座標系

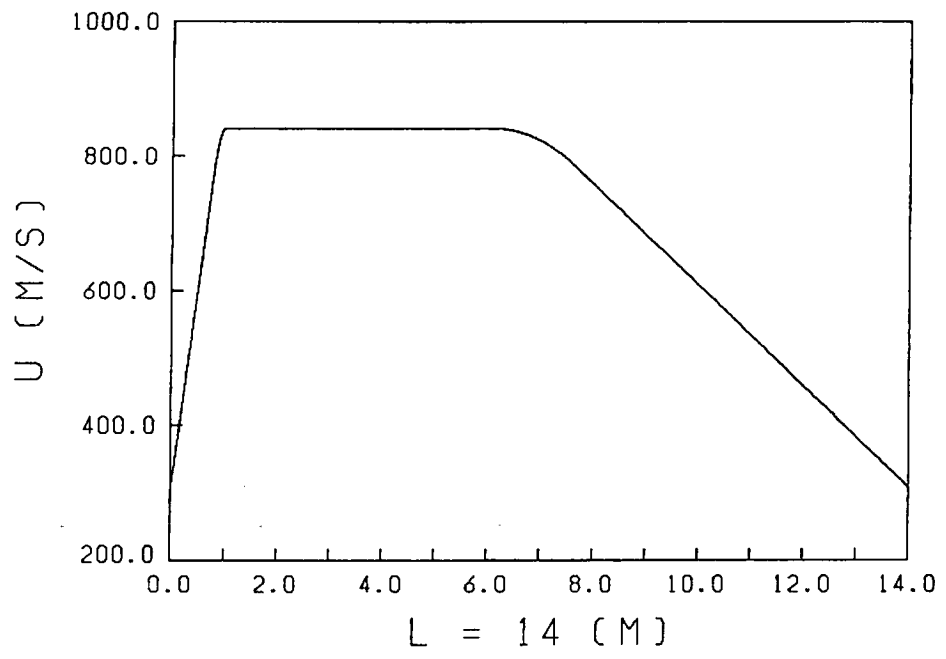


図 1. 4 定常計算の条件となる流速分布

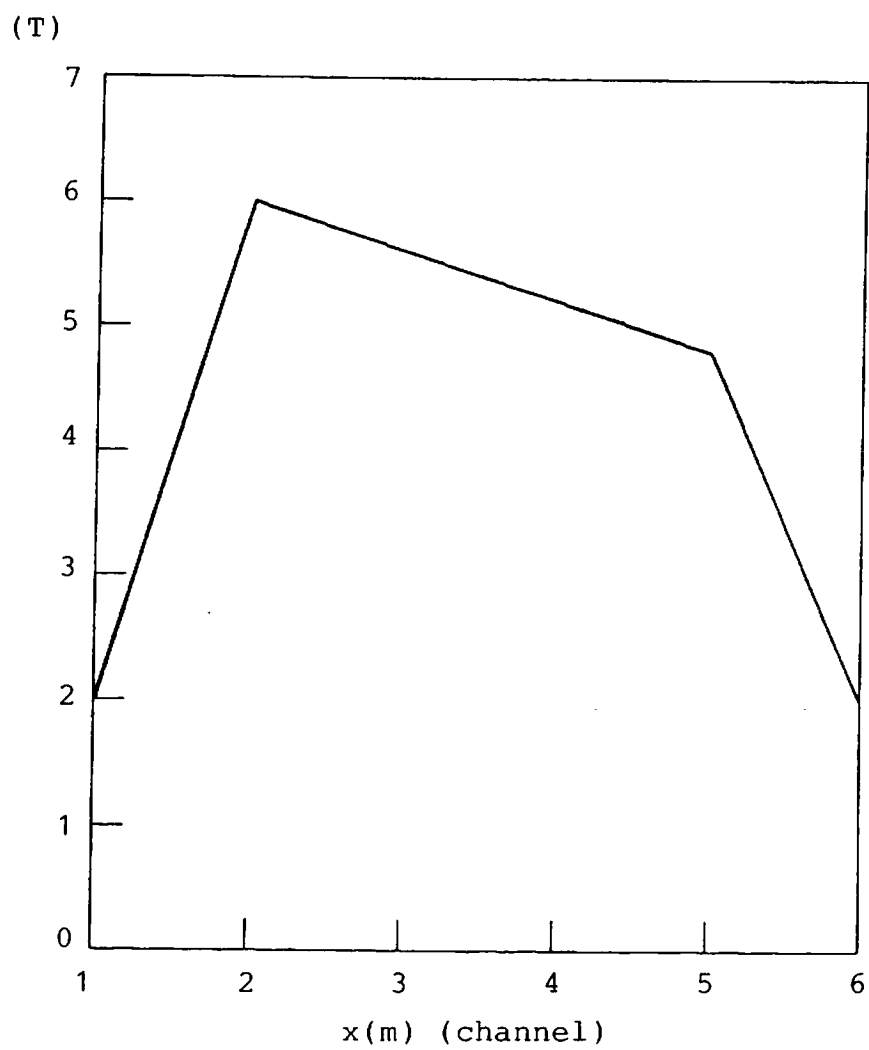


图 1. 5 磁束密度分布

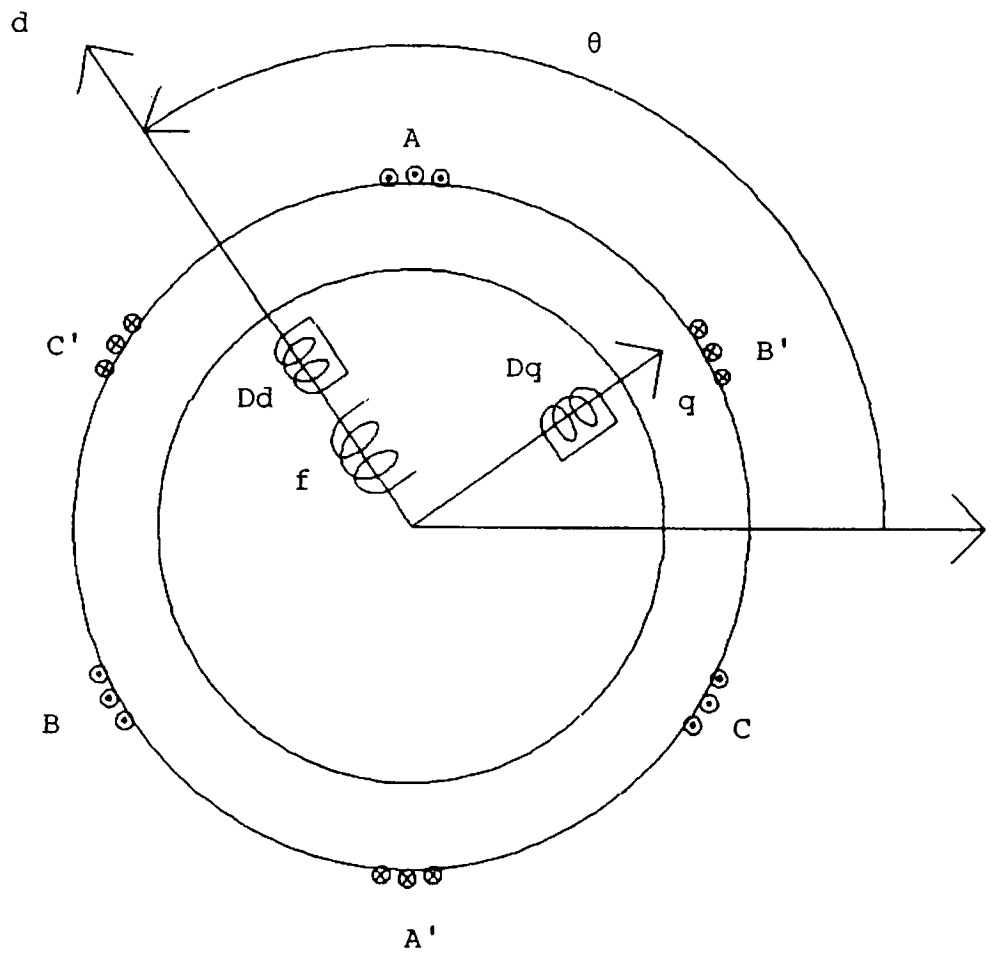
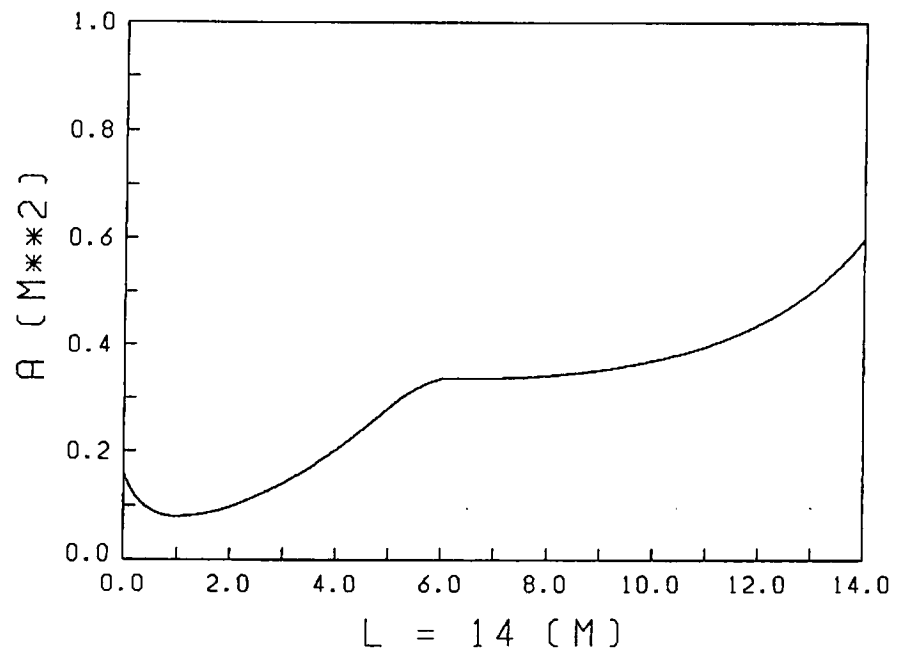
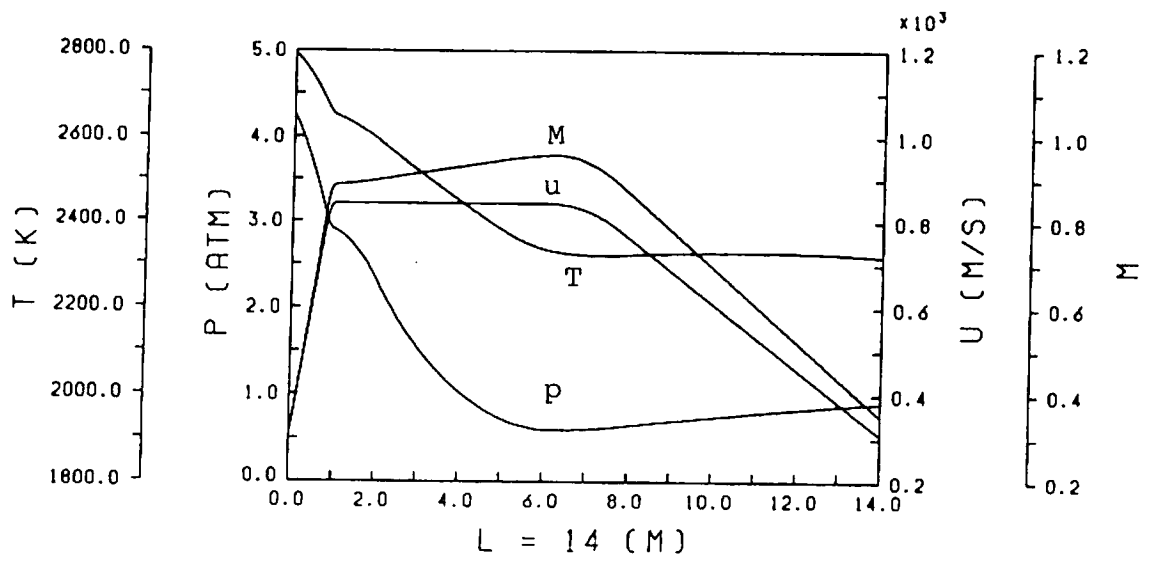


図 1. 6 同期発電機の d q 座標軸

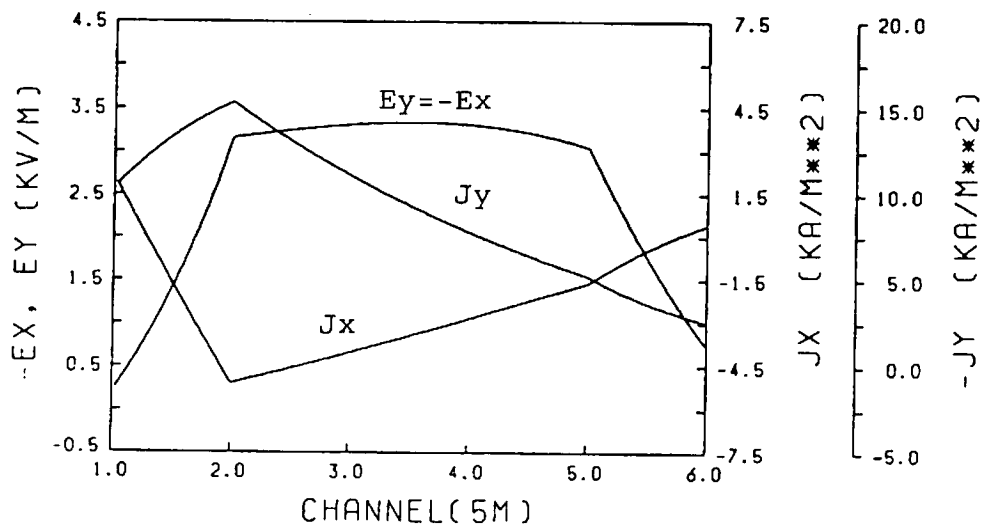


(a) ダクト断面積

図 2. 1 M H D 発 電 機 諸 量 初 期 分 布



(b) 流速  $u$ 、マッハ数  $M$ 、圧力  $p$ 、温度  $T$



(c)  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $J_x$ ,  $J_y$

図 2. 1 MHD 発電機諸量初期分布

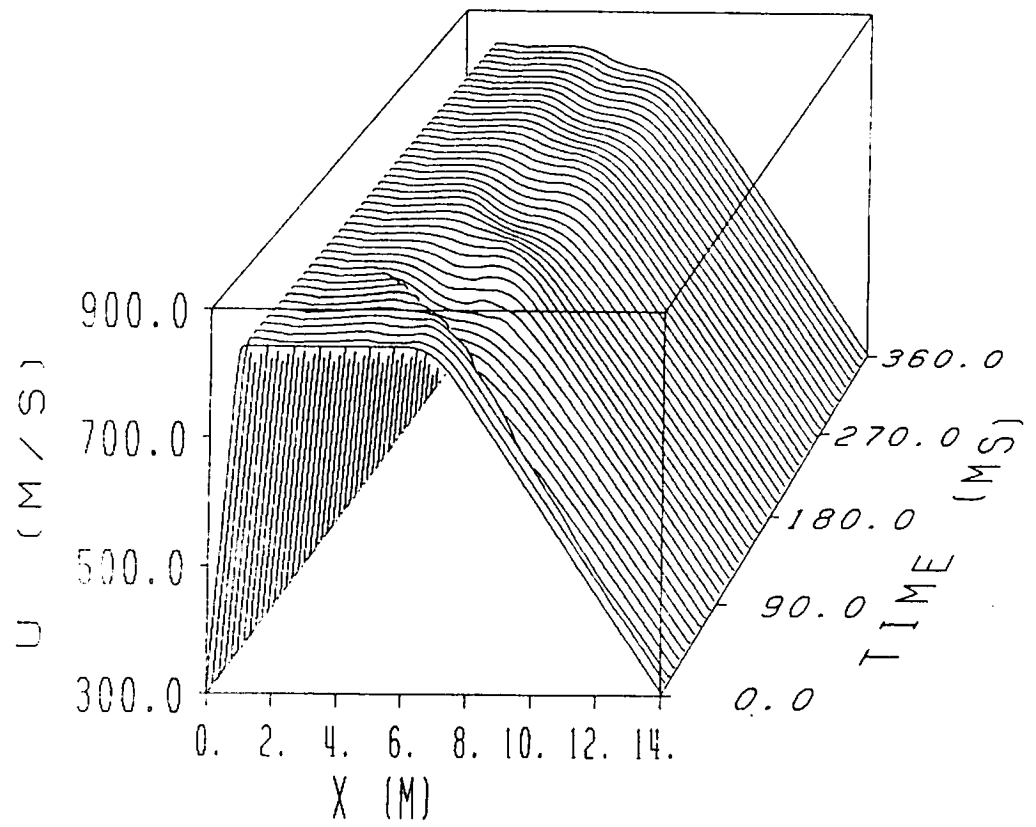
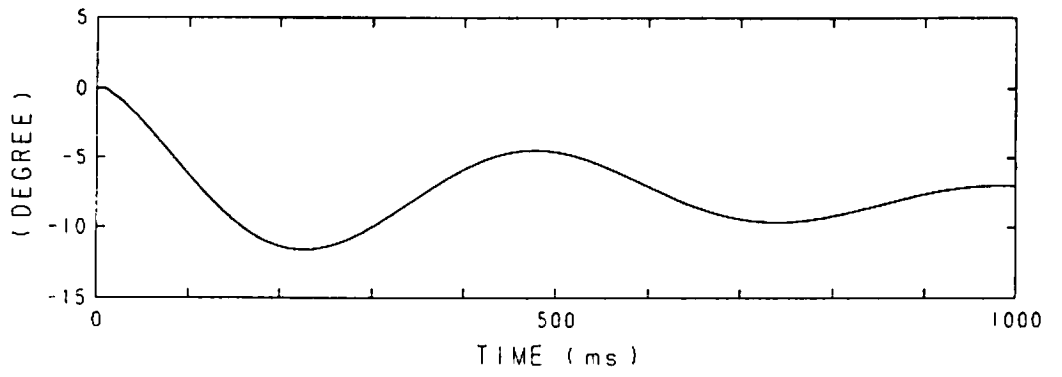
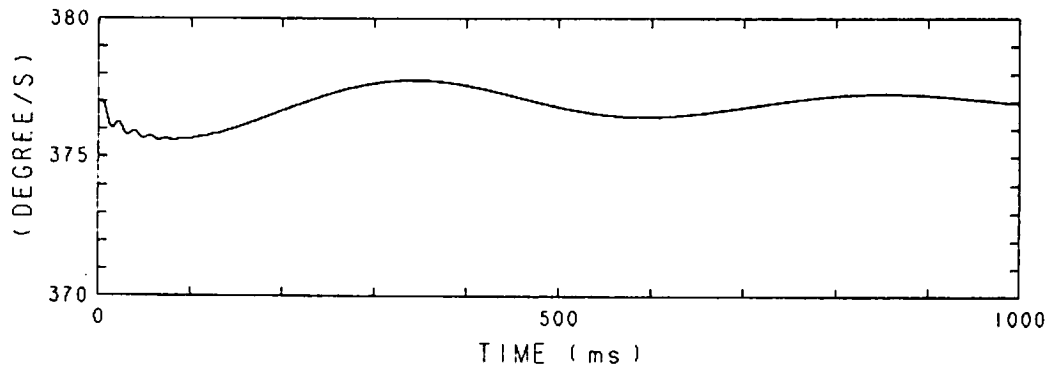


図 2. 2 MHD 発電機 単独計算時流速分布の時間変化



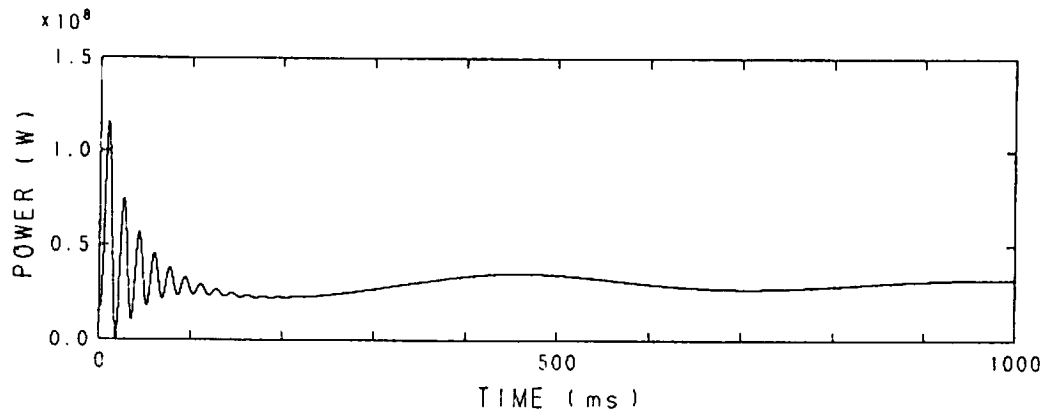


(a) 回轉子角偏差

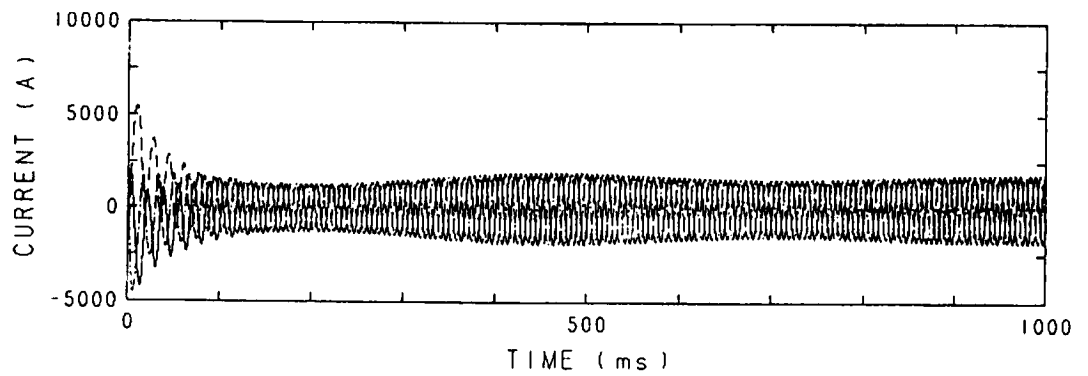


(b) 回轉子角速度

図 2. 3 同期発電機単独計算

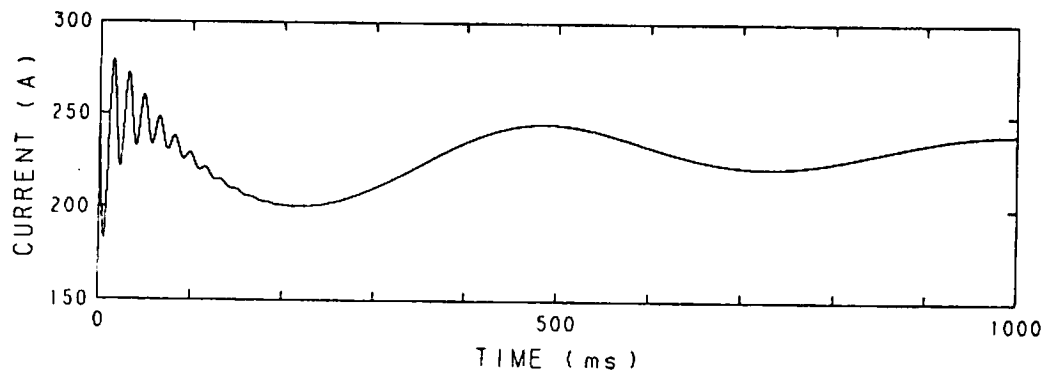


(c) 電気出力

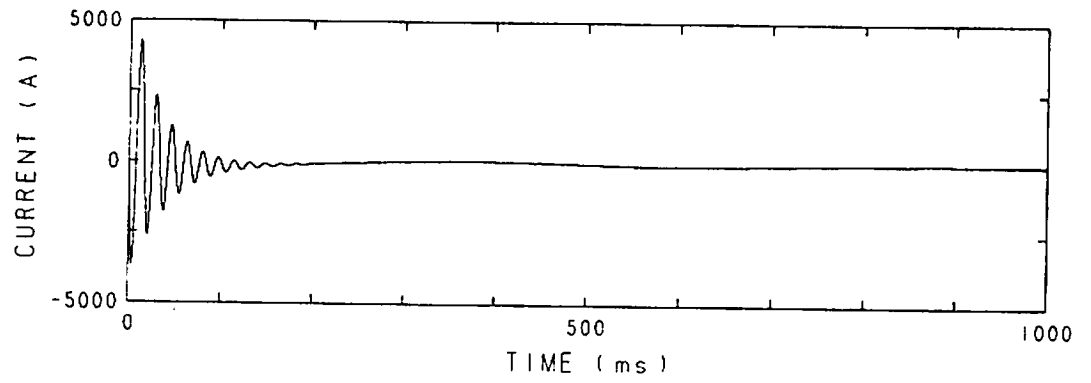


(d) 電機子巻線電流

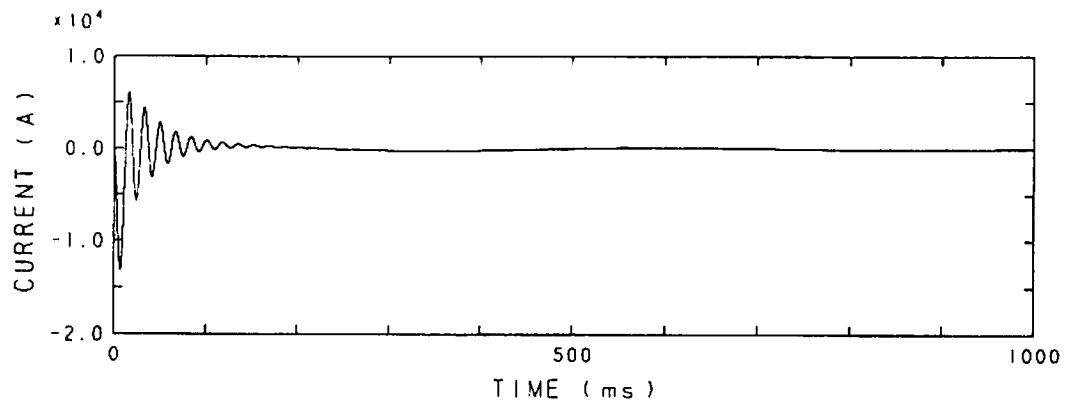
図 2. 3 同期発電機単独計算



(e) 界磁巻線電流

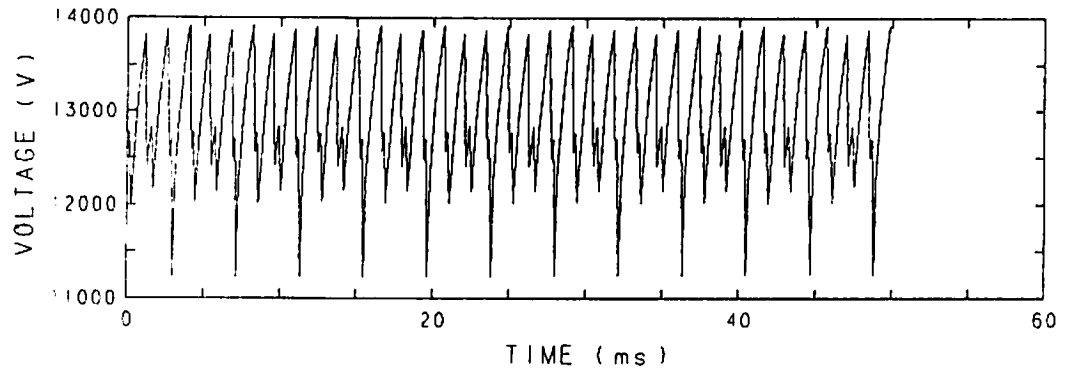


(f) d軸制動巻線電流

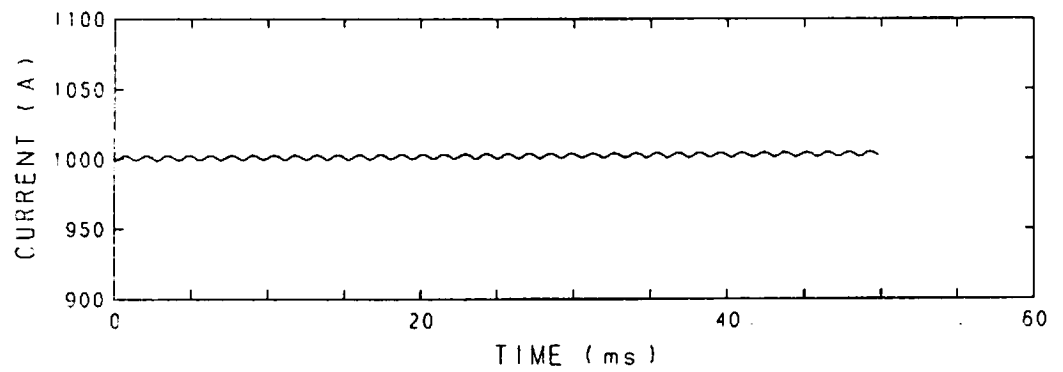


(g) q軸制動巻線電流

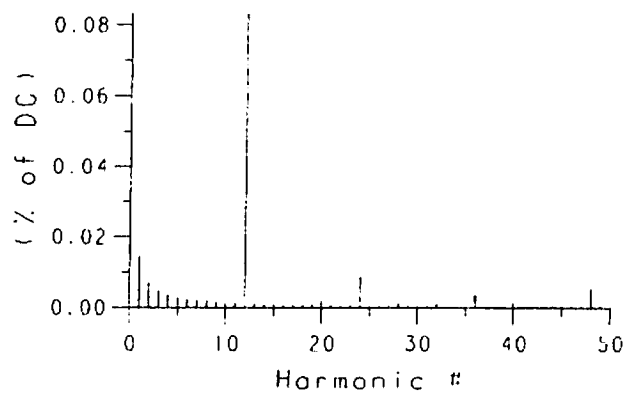
図 2. 3 同期発電機単独計算



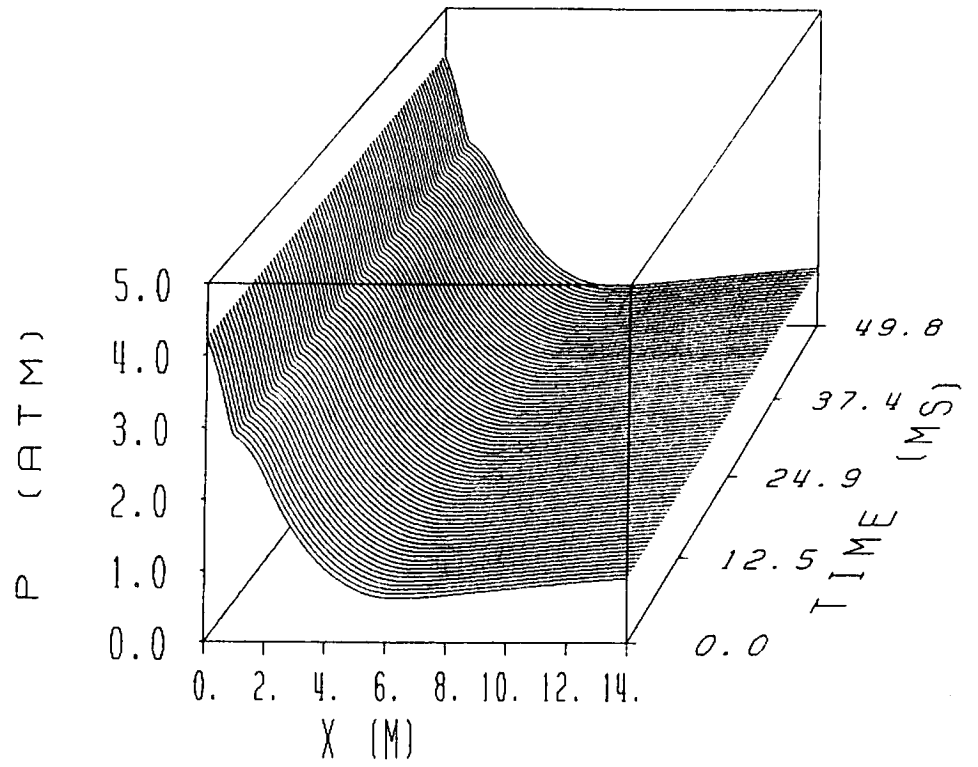
(a) MHD 発電機端子電圧



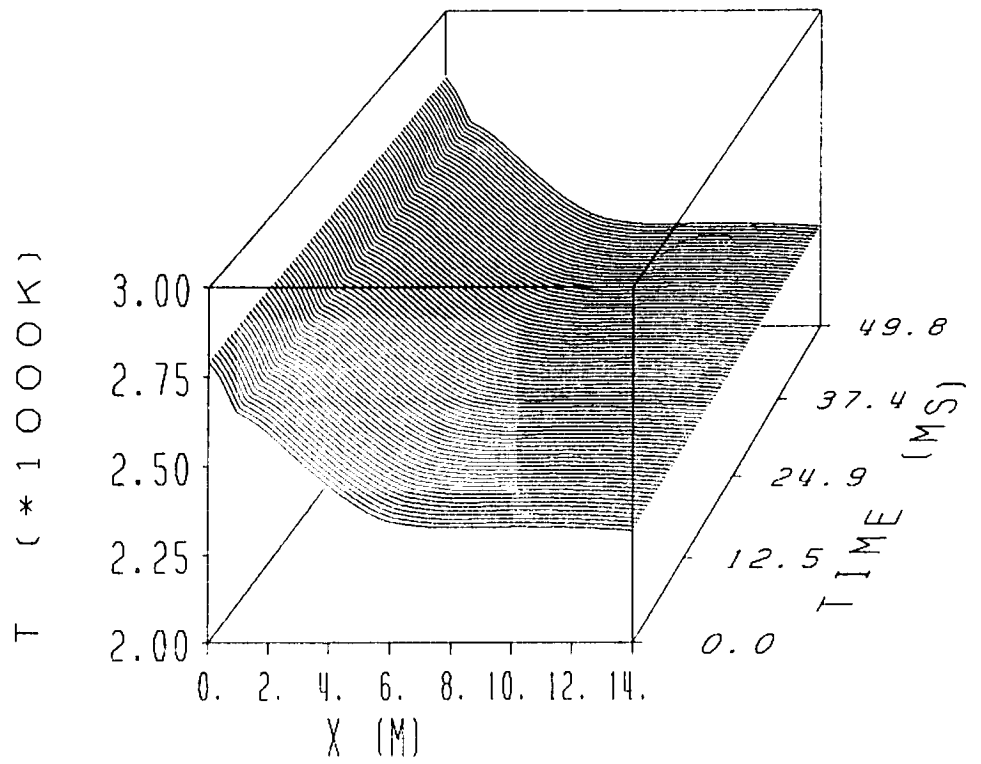
(b) MHD 発電機負荷電流



(c) MHD 発電機負荷電流の高調波解析

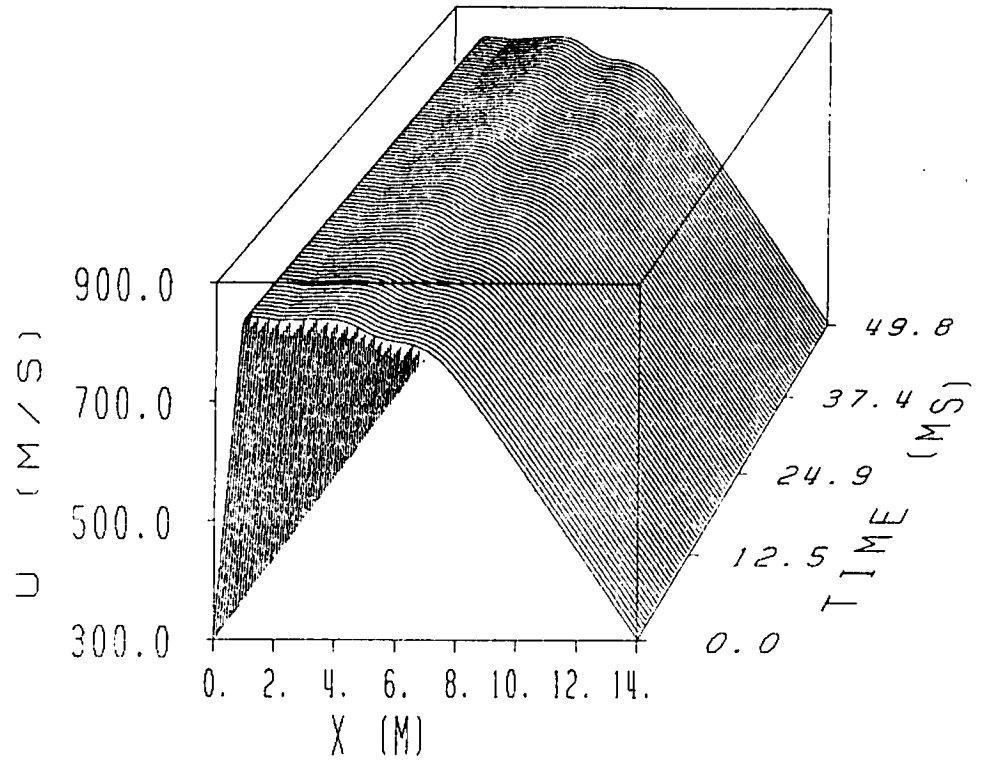


(d) 圧力

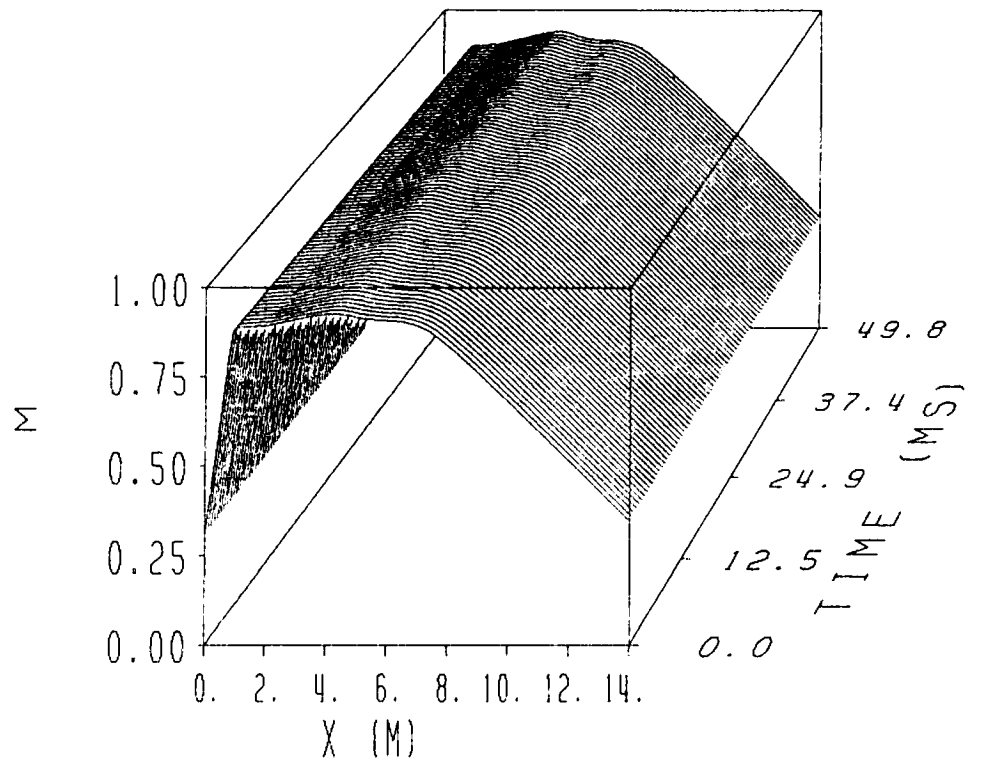


(e) 温度

図 2. 4 定常運転時の MHD 発電機 の 特性

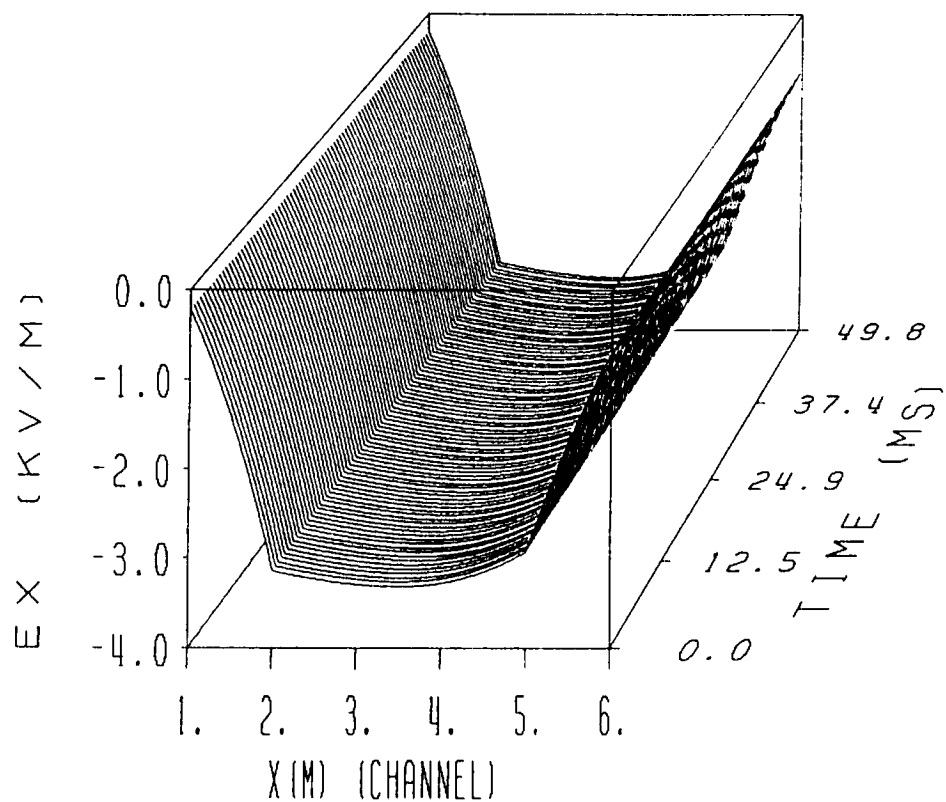


(f) 流速

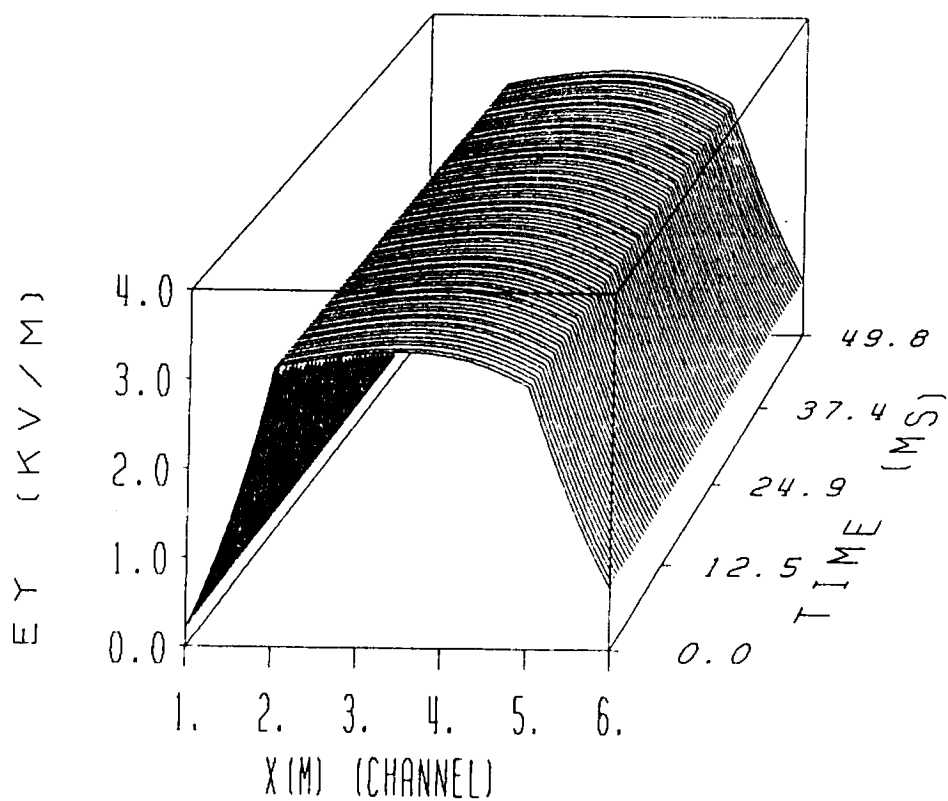


(g) マッハ数

図 2. 4 定常運転時の MHD 発電機 の 特性

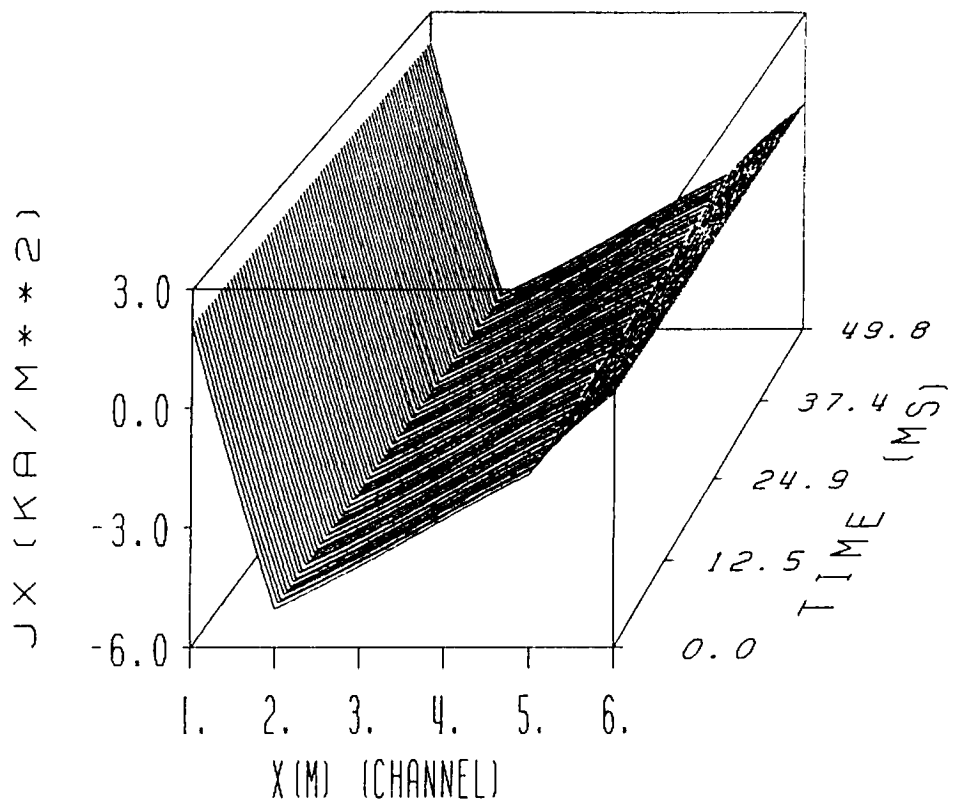


(h) 電界の x 成分

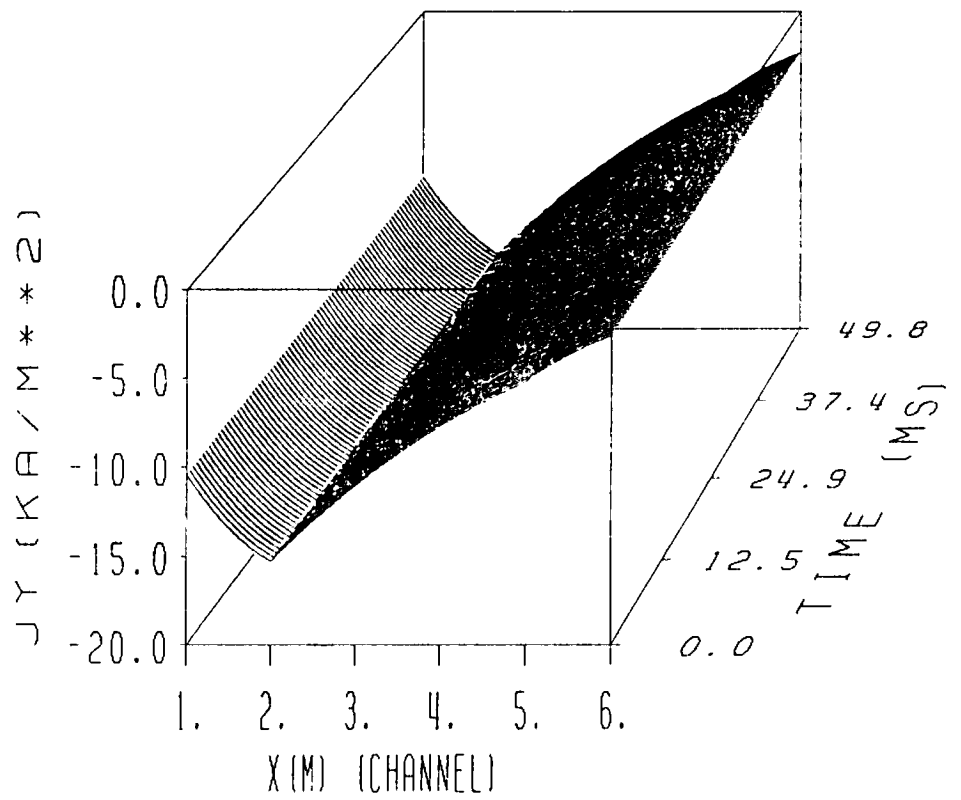


(i) 電界の y 成分

図 2. 4 定常運転時の MHD 発電機 の 特性



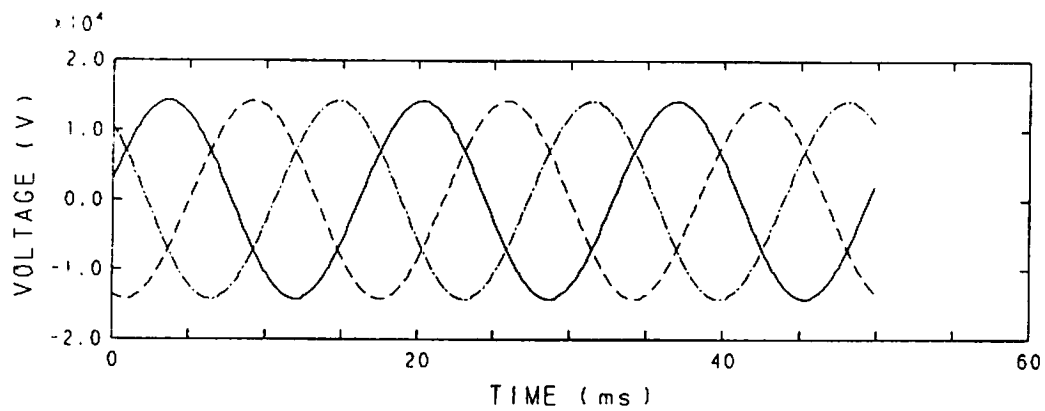
(j) 電流密度のx成分



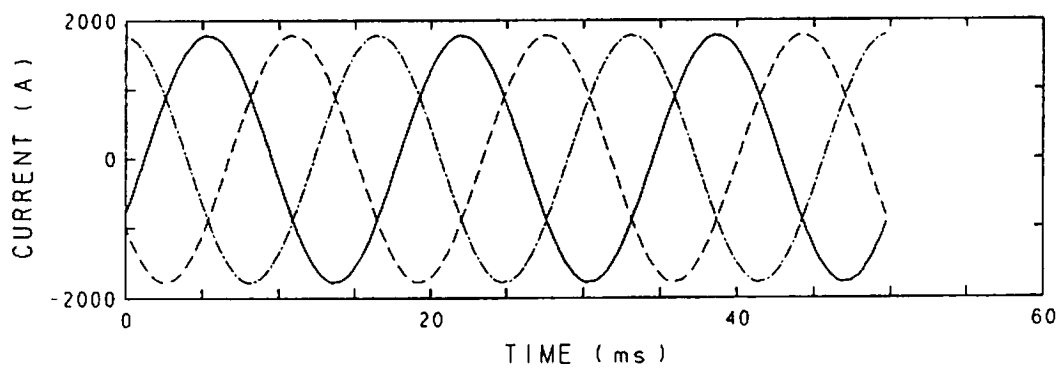
(k) 電流密度のy成分

図2. 4 定常運転時のMHD発電機の特性



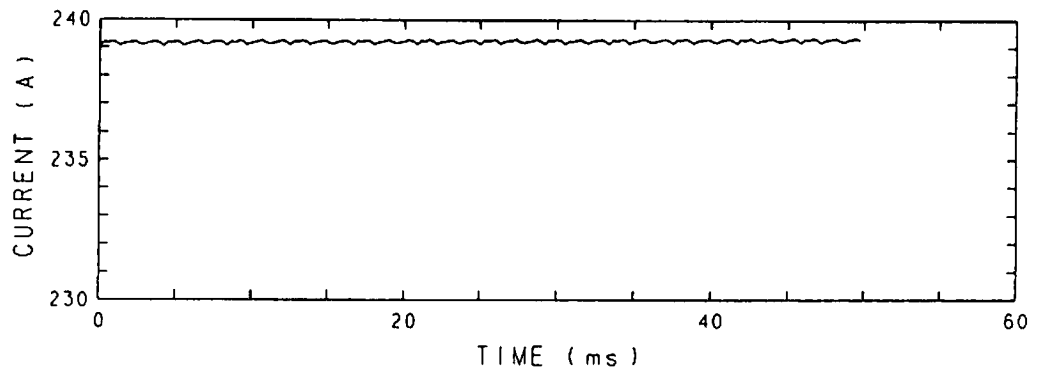


(a) 同期発電機端子電圧

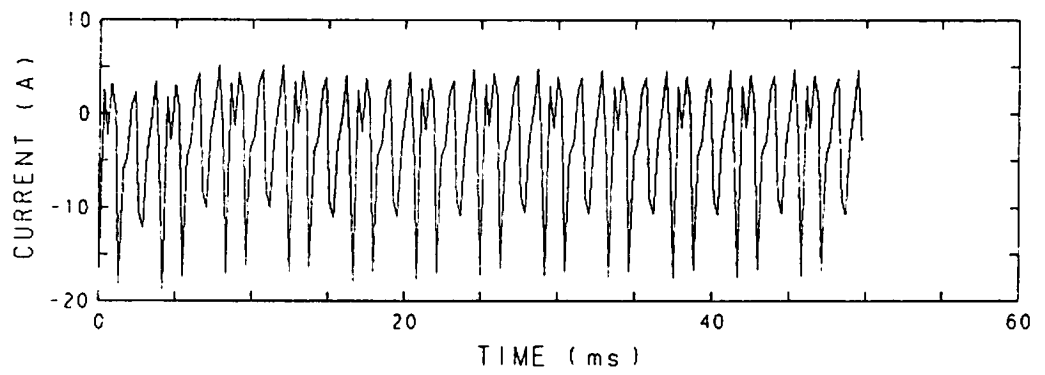


(b) 同期発電機電機子巻線電流

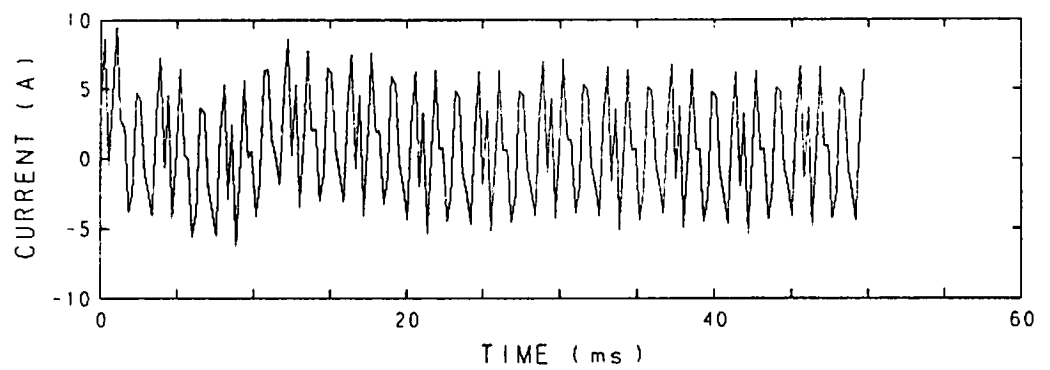
図 2. 5 定常運転時の同期発電機の特長



(c) 界磁巻線電流

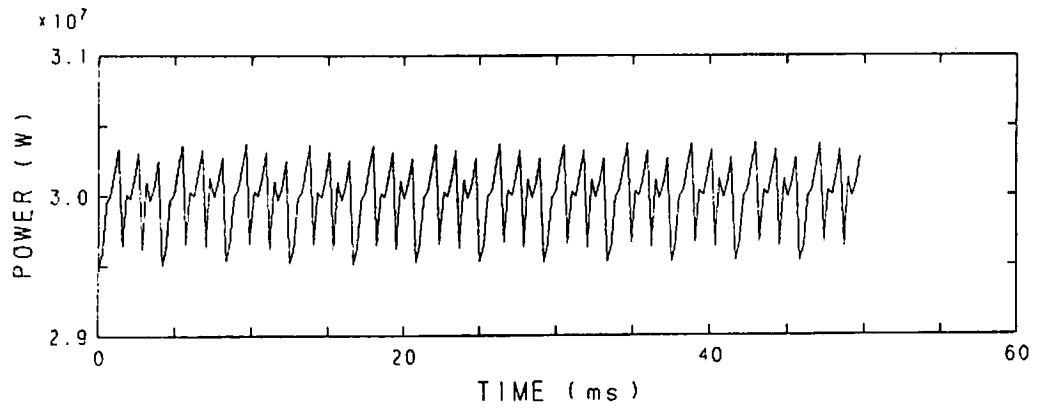


(d) d軸制動巻線電流

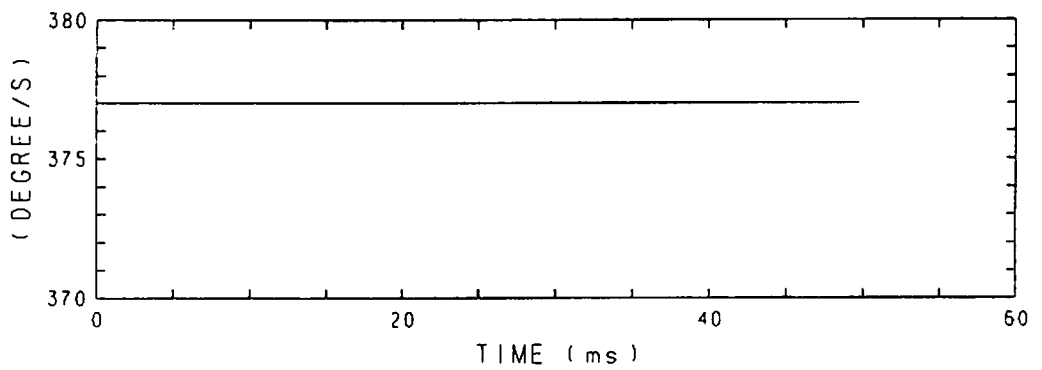


(e) q軸制動巻線電流

図 2. 5 定常運転時の同期発電機の特徴

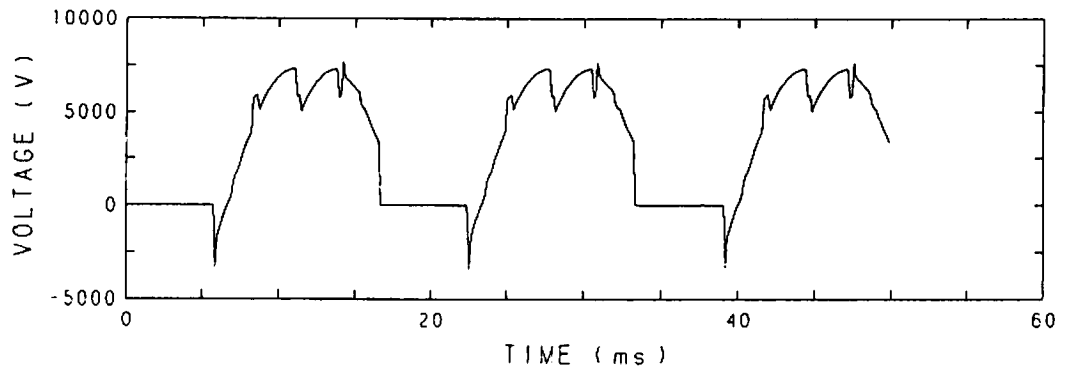


(f) 出力

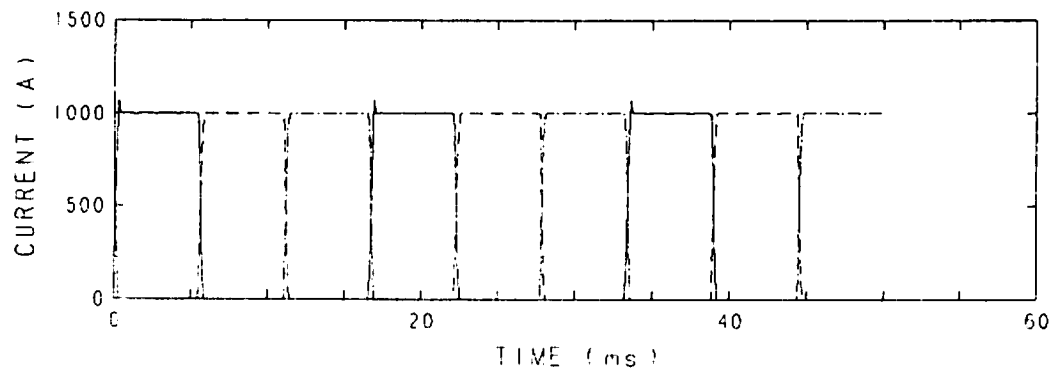


(g) 回転子角速度

図 2. 5 定常運転時の同期発電機の特徴

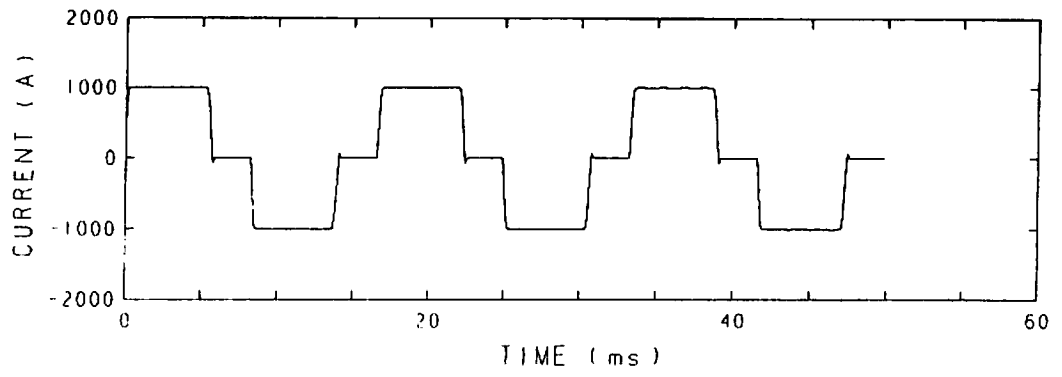


(a) サイリスタ  $S_{01}$  の印加電圧

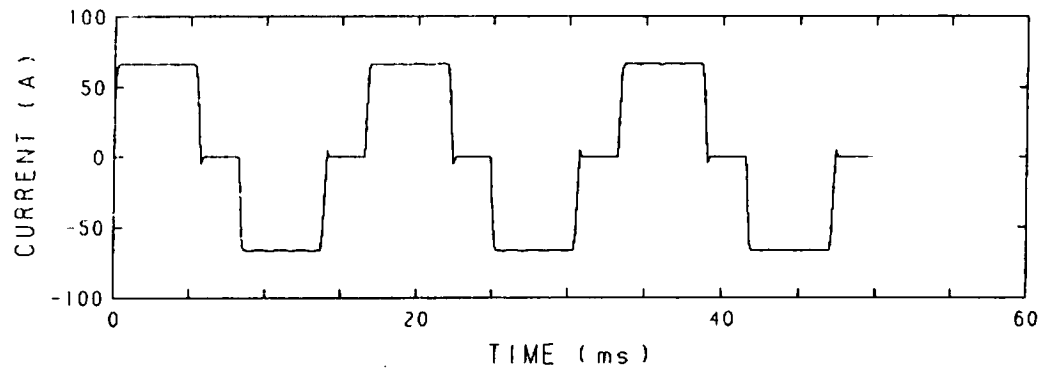


(b) サイリスタ  $S_{01}$ 、 $S_{03}$ 、 $S_{05}$  の電流波形

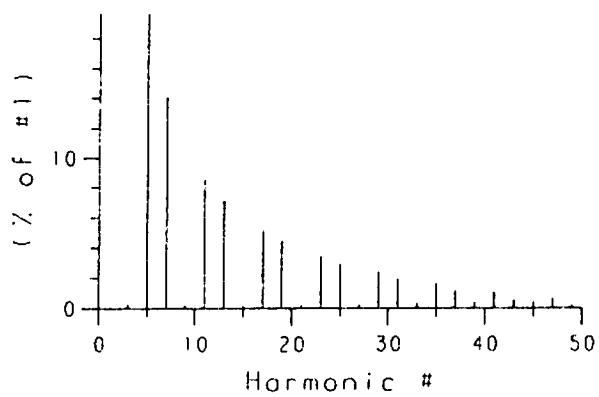
図 2. 6 定常運転時の電力系統の特性



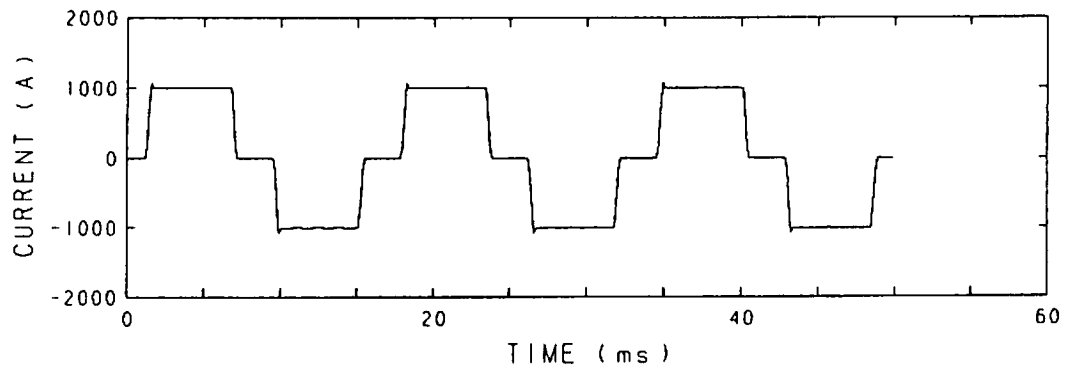
(c) 上側変圧器一次側電流



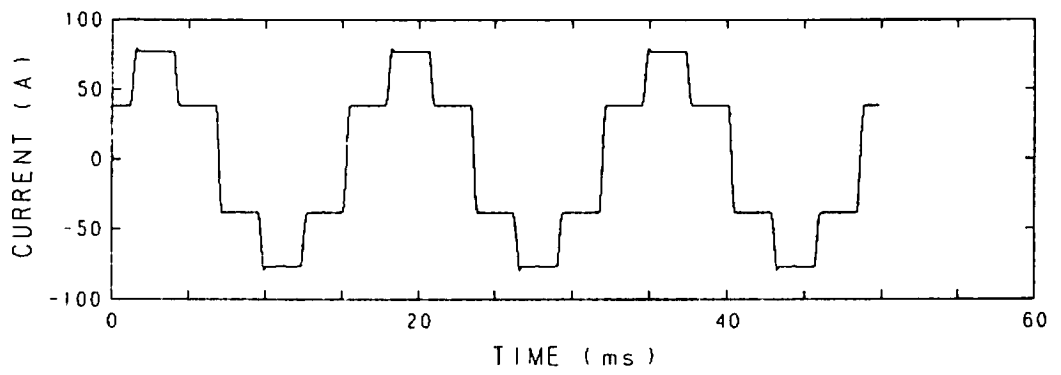
(d) 上側変圧器二次側電流



(e) 上側変圧器一次側電流高調波解析結果

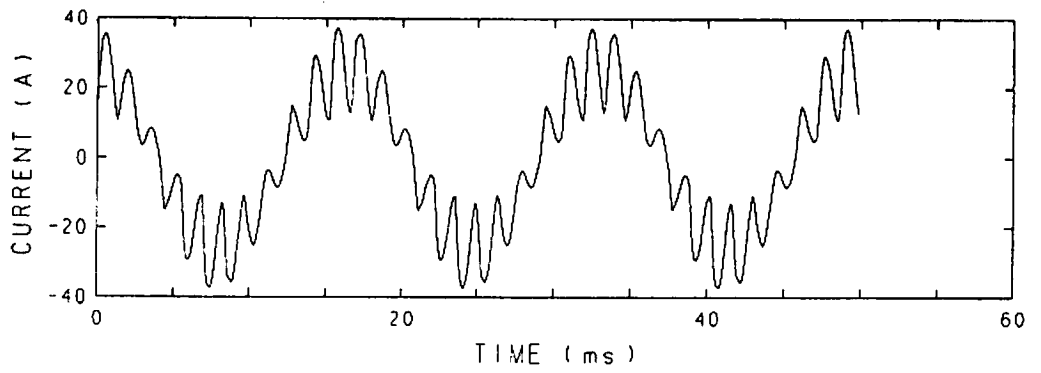


(f) 下側変圧器一次側電流

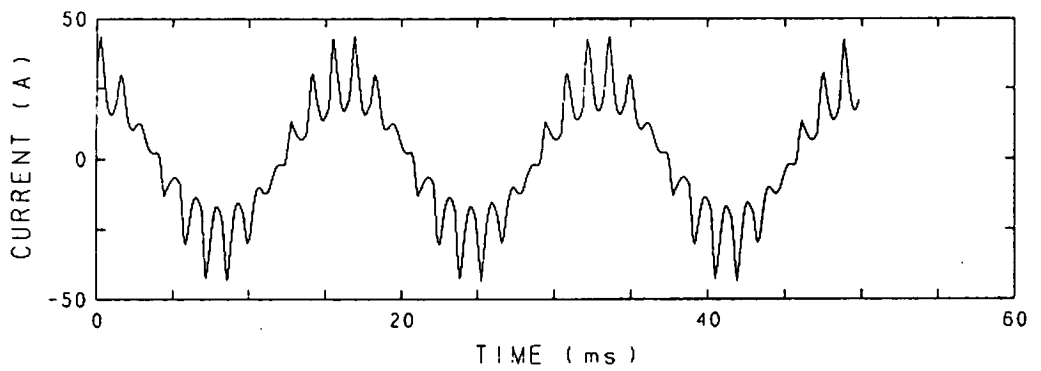


(g) 下側変圧器二次側電流

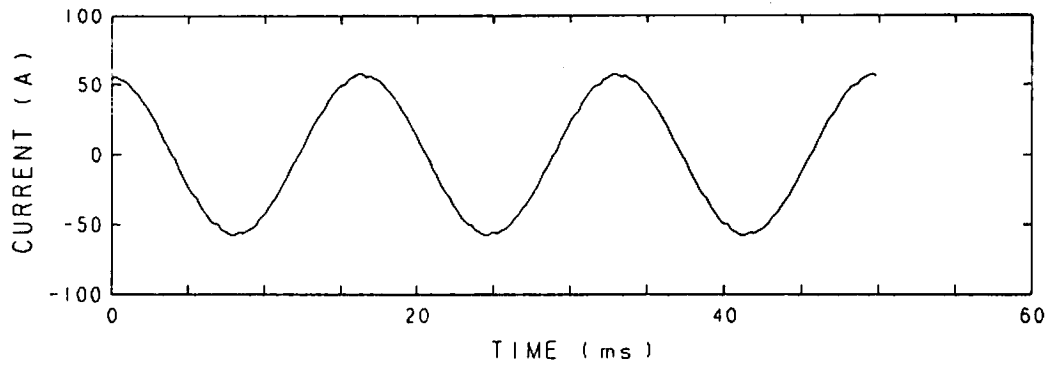
図 2. 6 定常運転時の電力系統の特性



(h) 第11高調波フィルタ電流

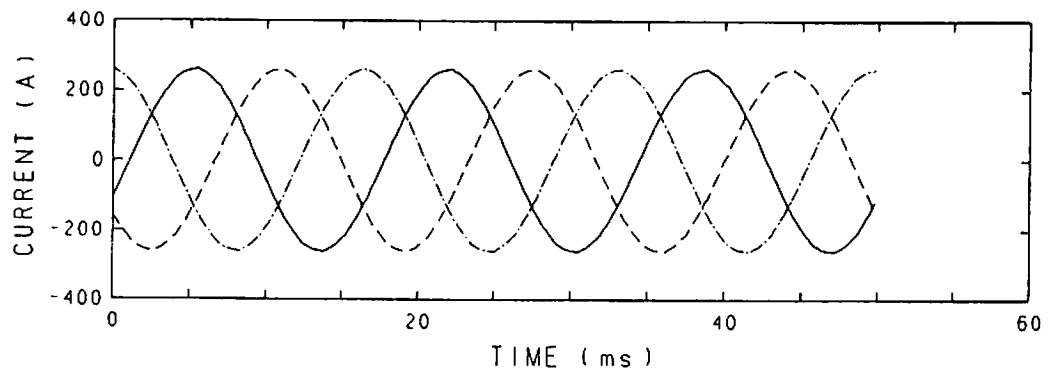


(i) 第13高調波フィルタ電流

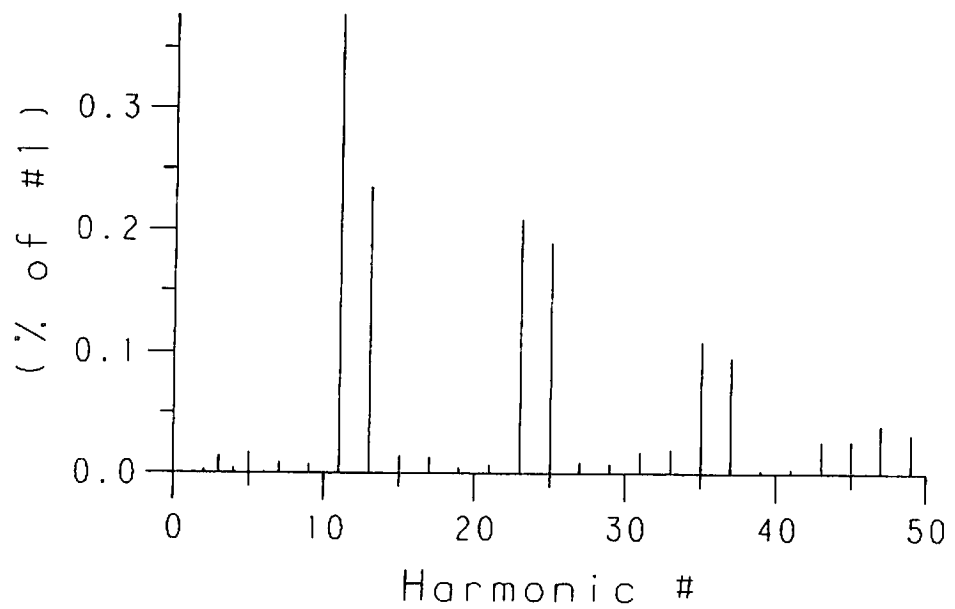


(j) 調相器電流

図 2. 6 定常運転時の電力系統の特性



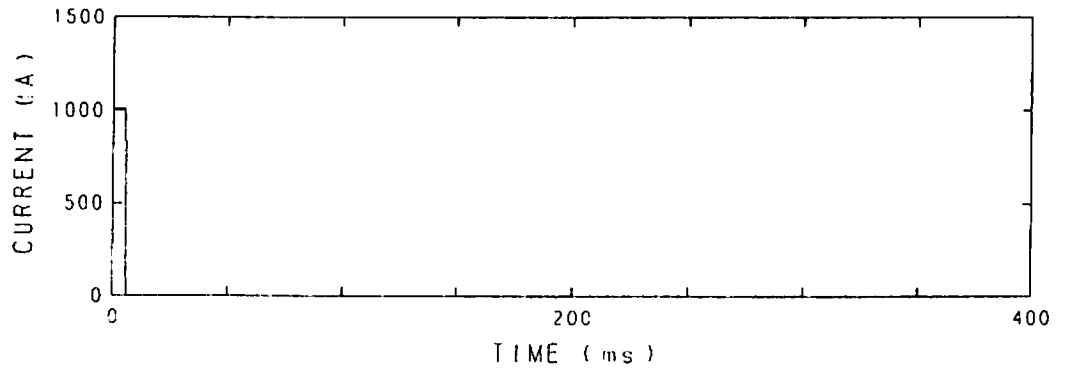
(k) 送電線電流



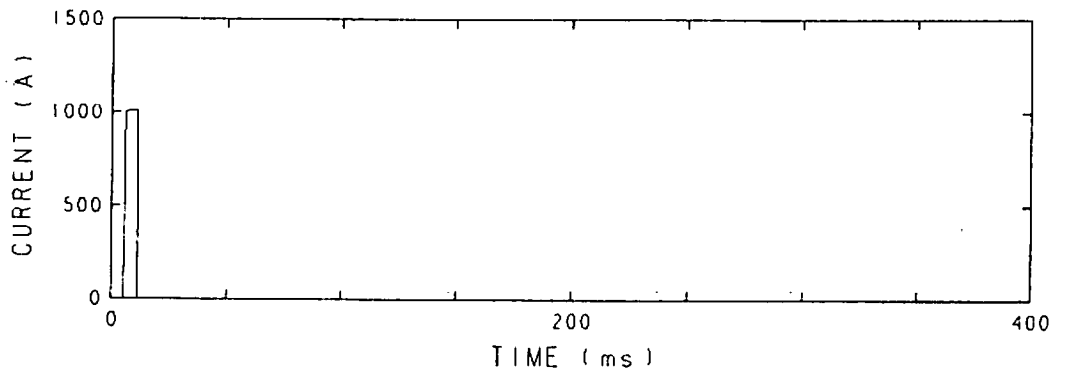
(1) 送電線電流の高調波解析

図 2. 6 定常運転時の電力系統の特性

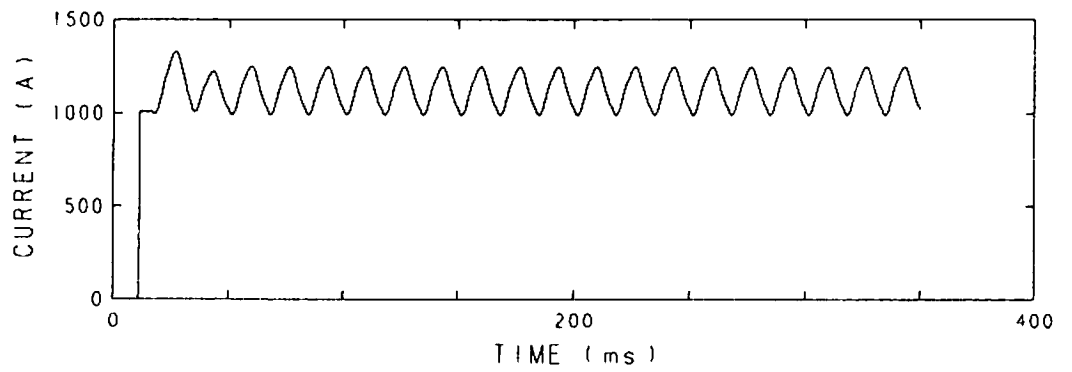




S<sub>01</sub>



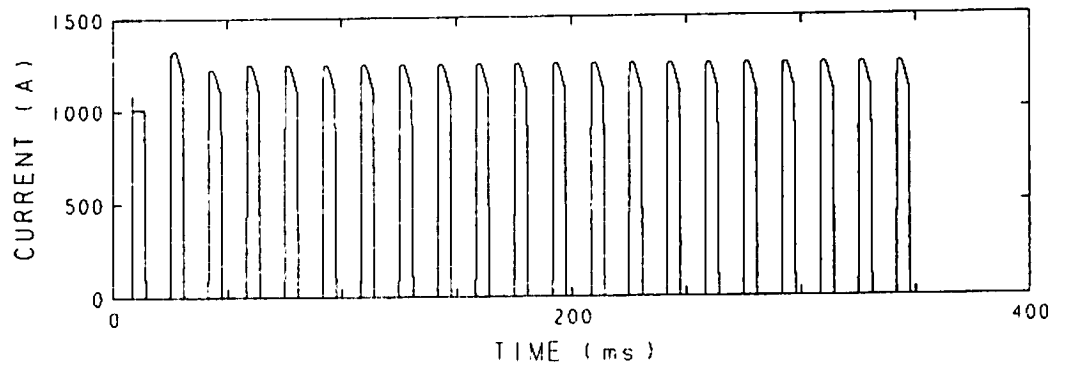
S<sub>03</sub>



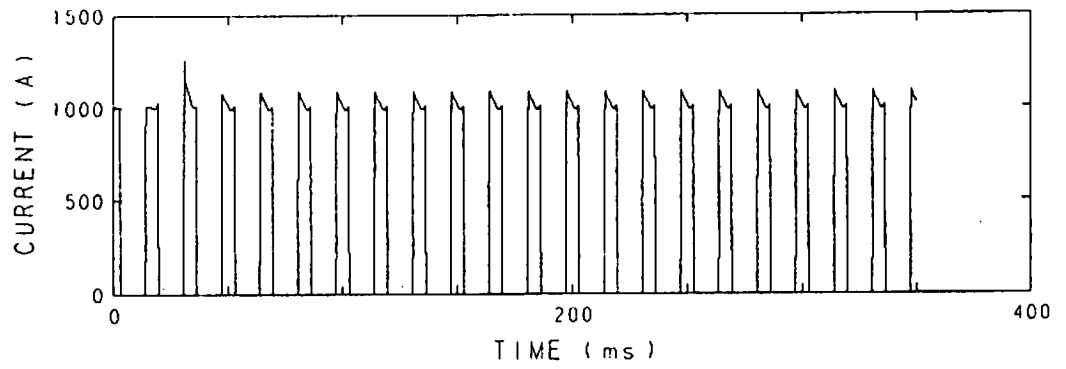
S<sub>05</sub>

(a) サイリスタ電流波形

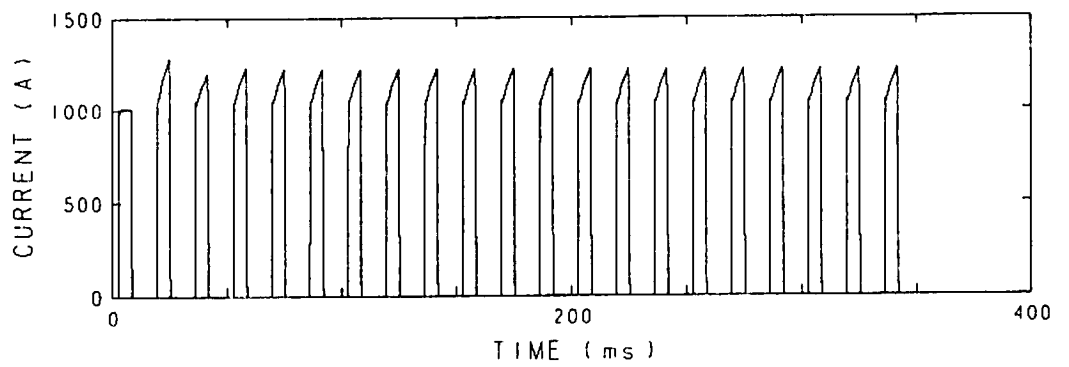
図 3. 1 インバータの点弧失敗事故時の特性



S<sub>02</sub>



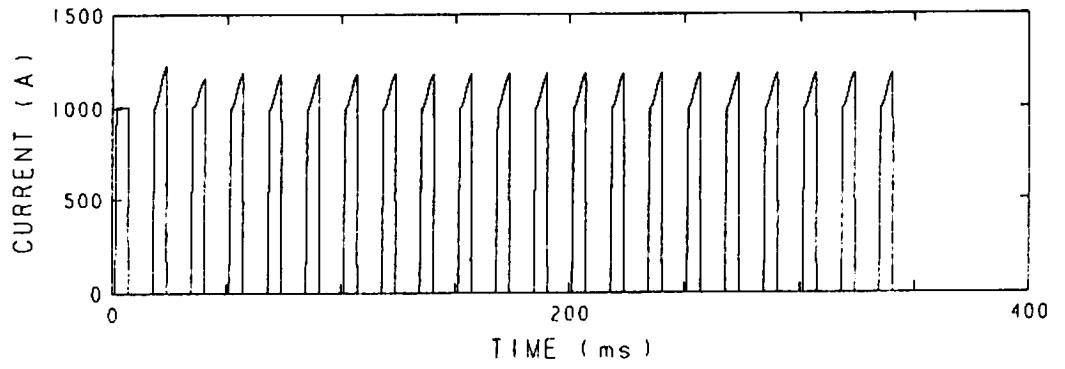
S<sub>04</sub>



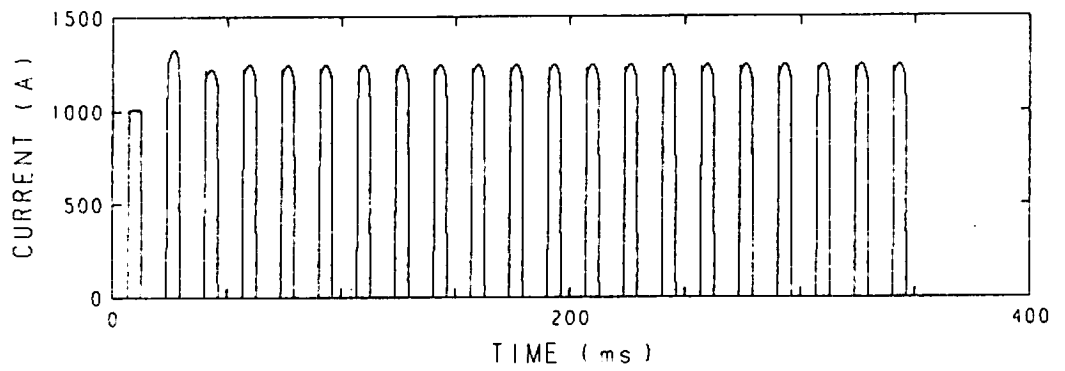
S<sub>06</sub>

(a) サイリスタ電流波形

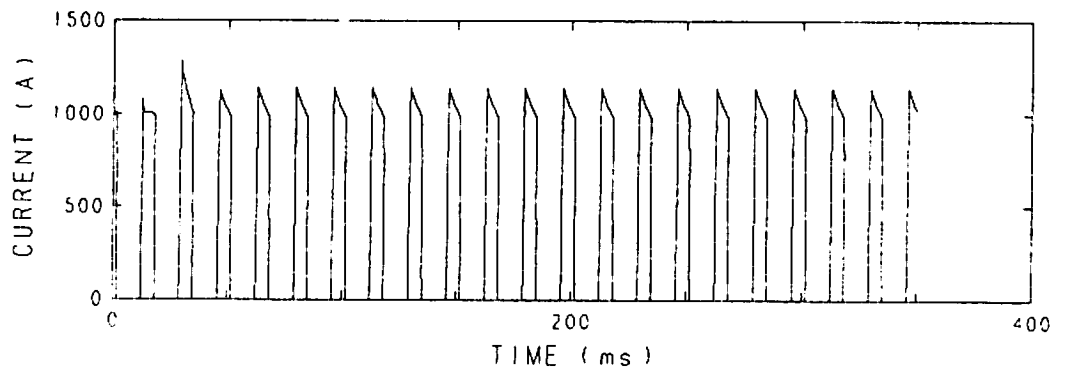
図 3. 1 インバータの点弧失敗事故時の特性



S<sub>07</sub>



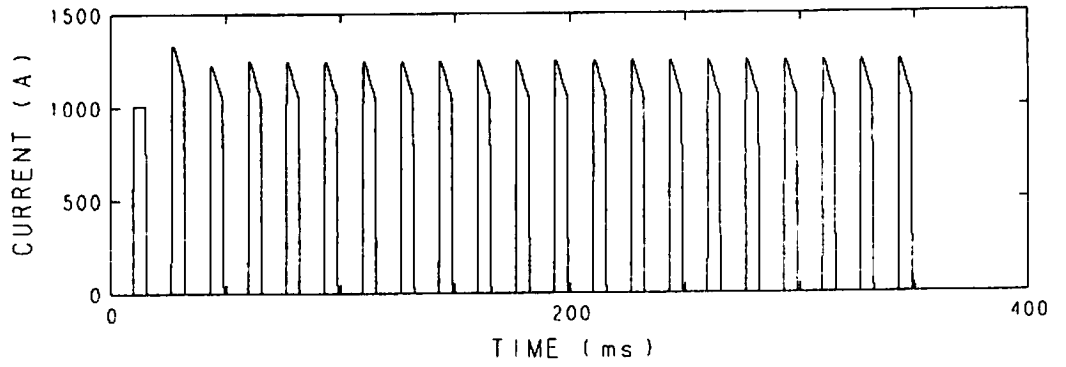
S<sub>09</sub>



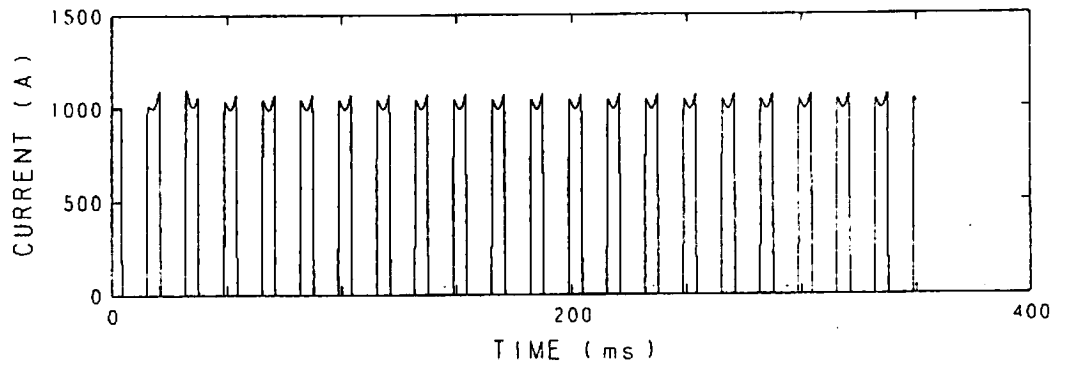
S<sub>11</sub>

(a) サイリスタ電流波形

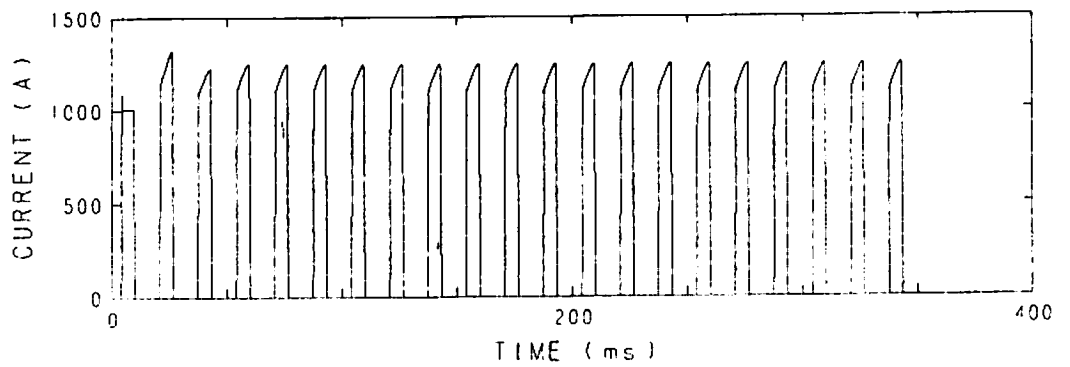
図3. 1 インバータの点弧失敗事故時の特性



S<sub>00</sub>



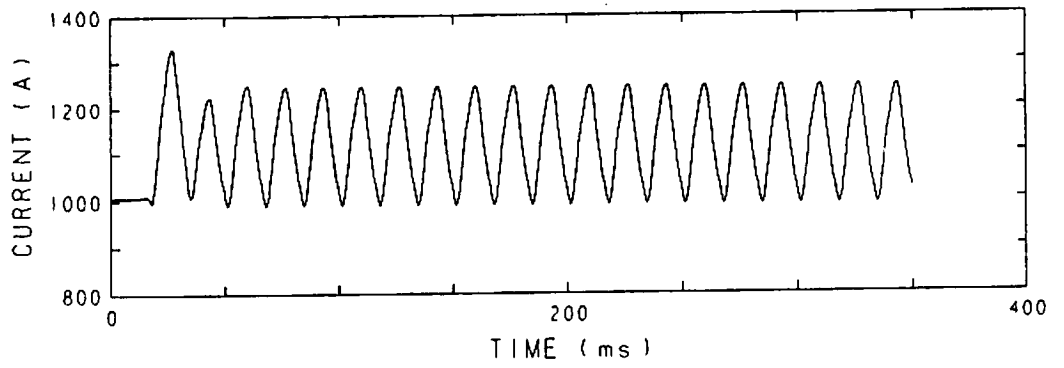
S<sub>10</sub>



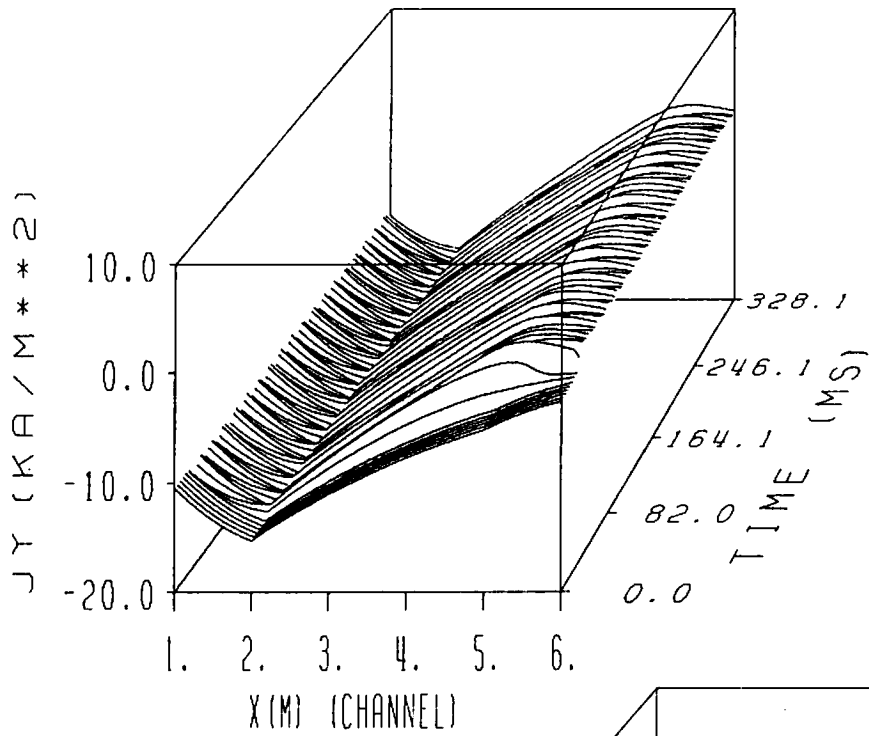
S<sub>12</sub>

(a) サイリスタ電流波形

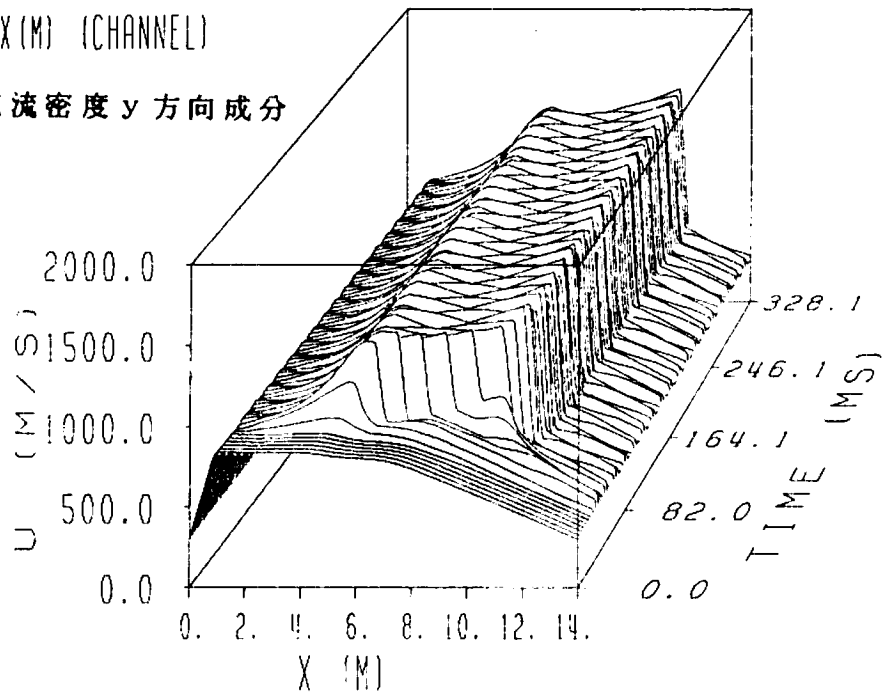
図 3. 1 インバータの点弧失敗事故時の特性



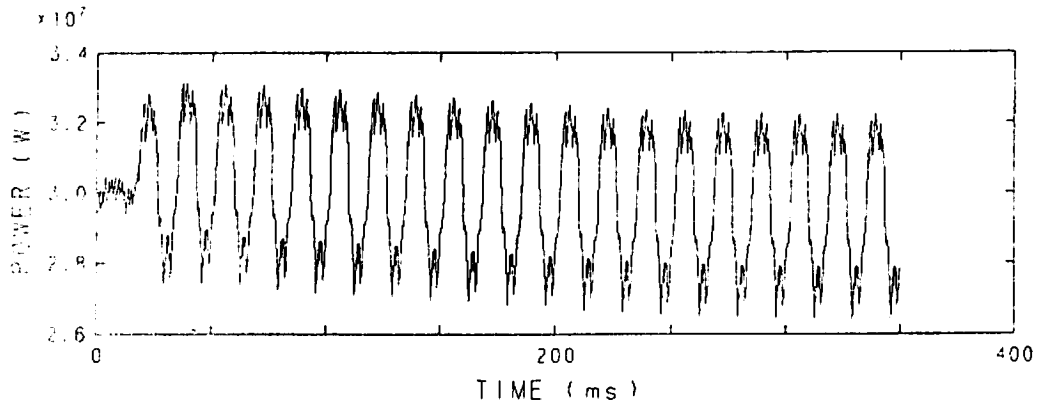
(b) MHD発電機負荷電流



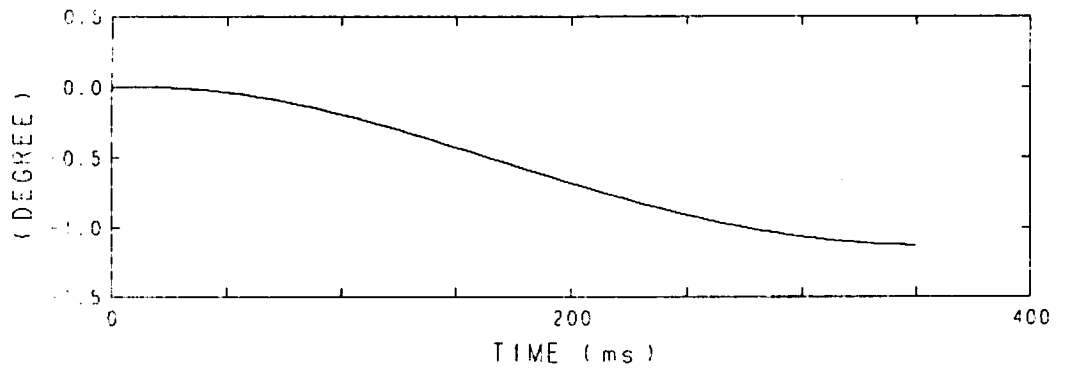
(c) MHD発電機チャンネル内電流密度y方向成分



(d) MHD発電機ダクト内流速分布

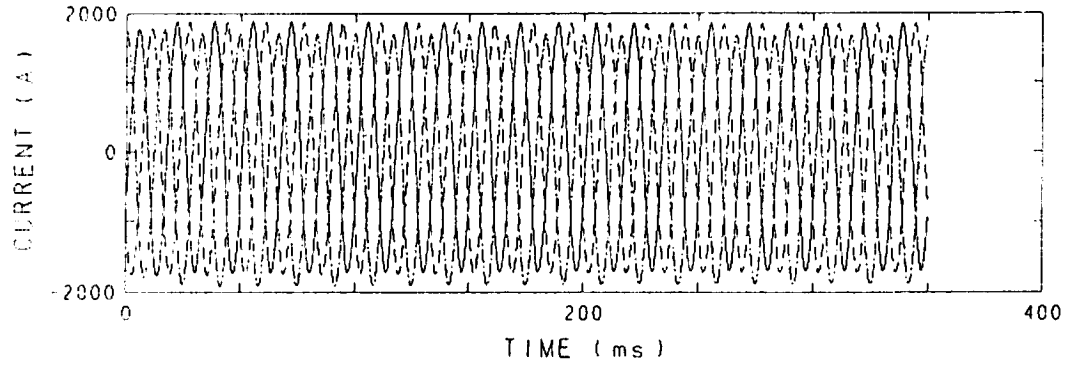


(e) 同期発電機出力

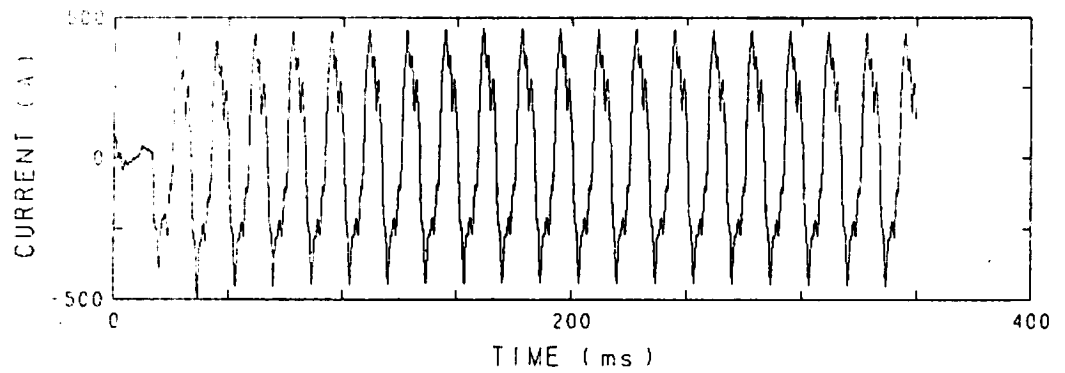


(f) 同期発電機回転子角偏差

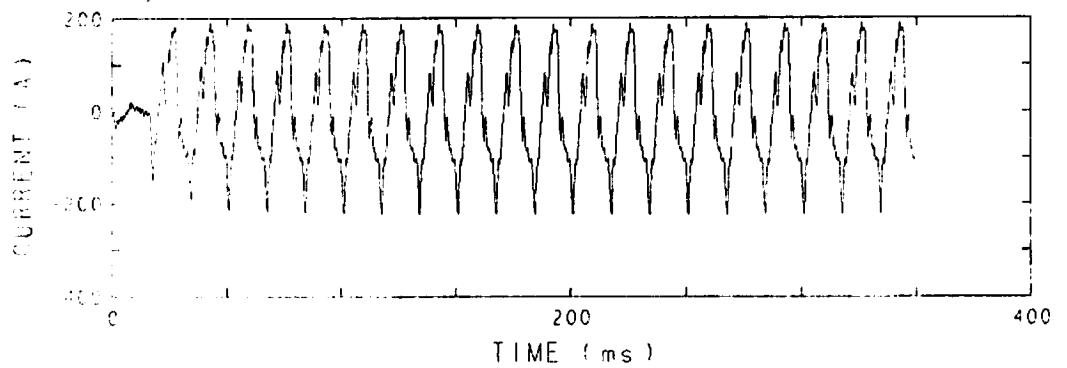
図 3. 1 インバータの点弧失敗事故時の特性



(g) 電機子巻線電流

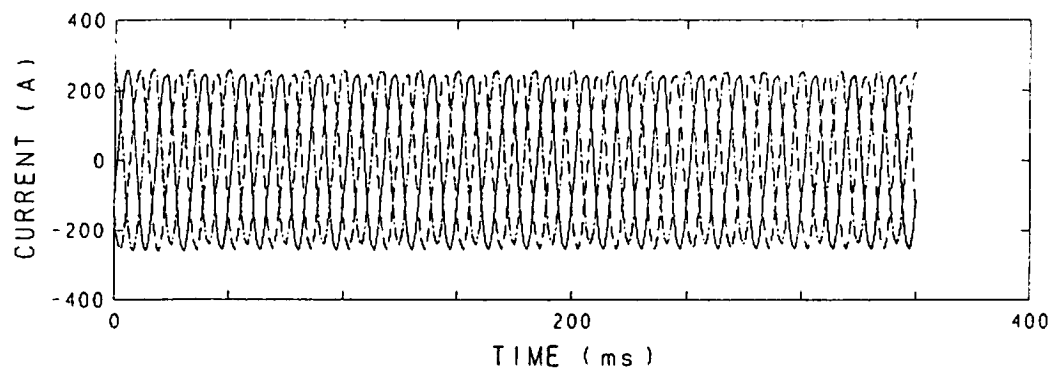


(h) d軸制動巻線電流

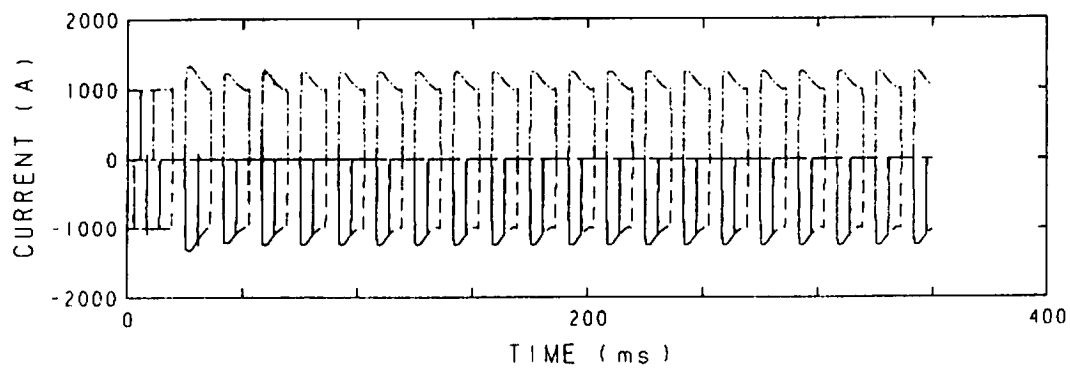


(i) q軸制動巻線電流

図3. 1 インバータの点弧失敗事故時の特性



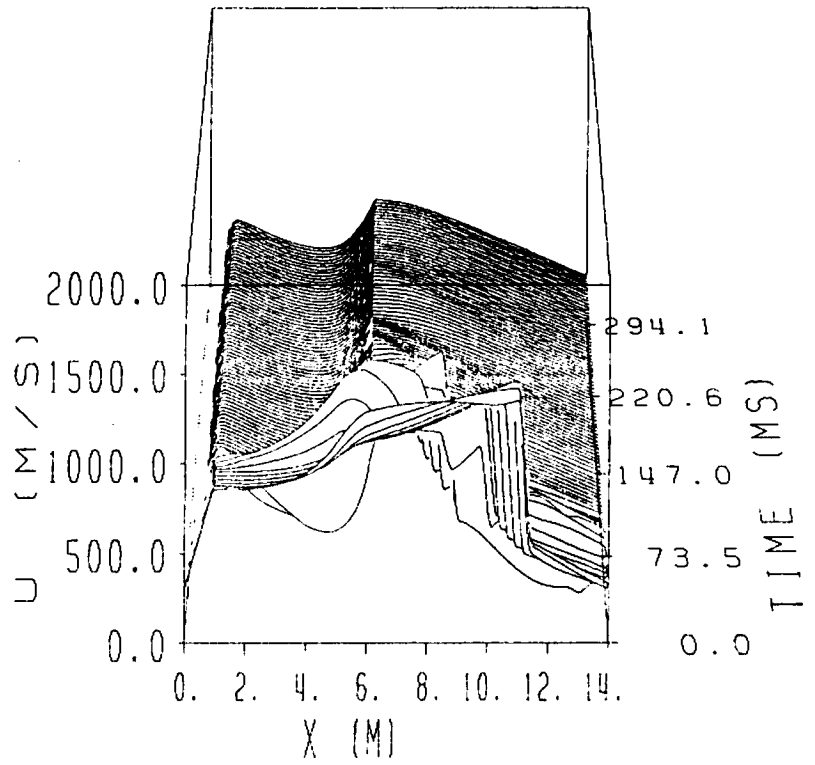
(j) a、b、c 相送電線電流



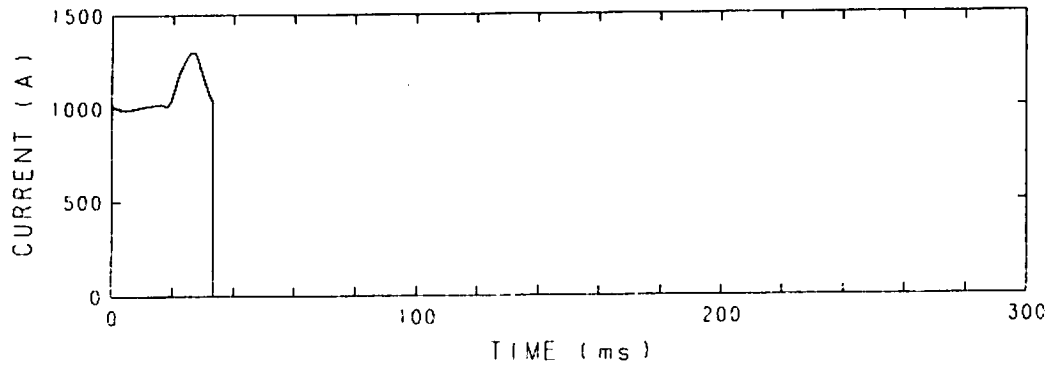
(k) 上側変圧器一次側電流

図 3. 1 インバータの点弧失敗事故時の特性

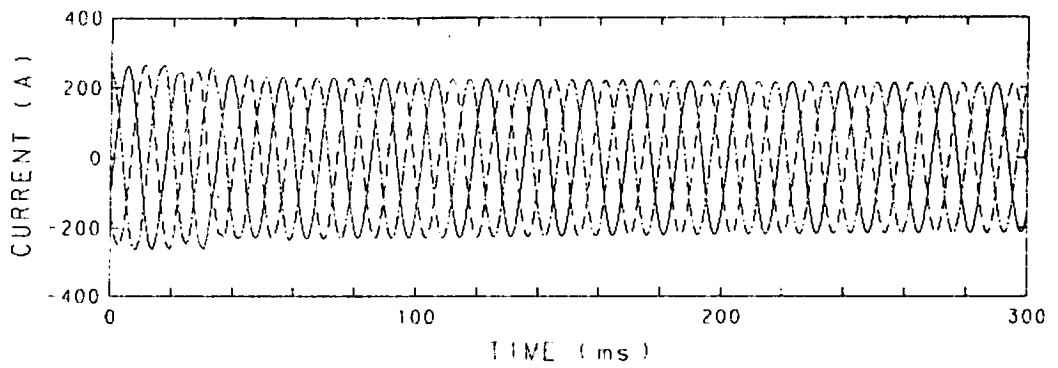




(a) MHD発電機ダクト内流速分布



(b) MHD発電機負荷電流



(c) a、b、c相送電線電流

図3. 2 インバータの点弧失敗事故後の対策

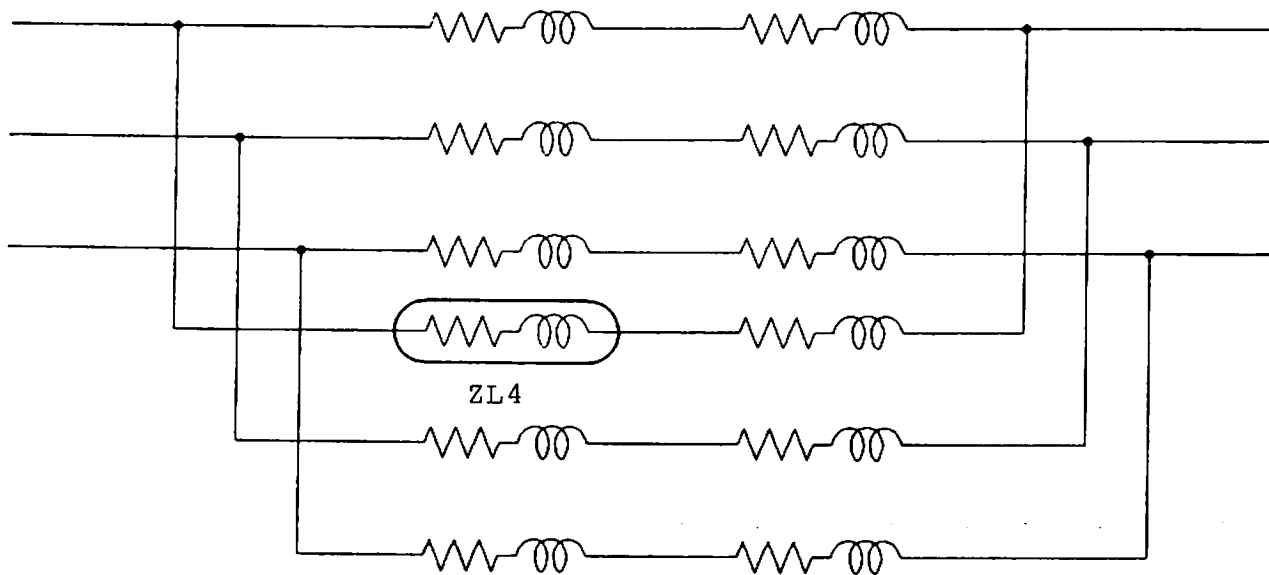
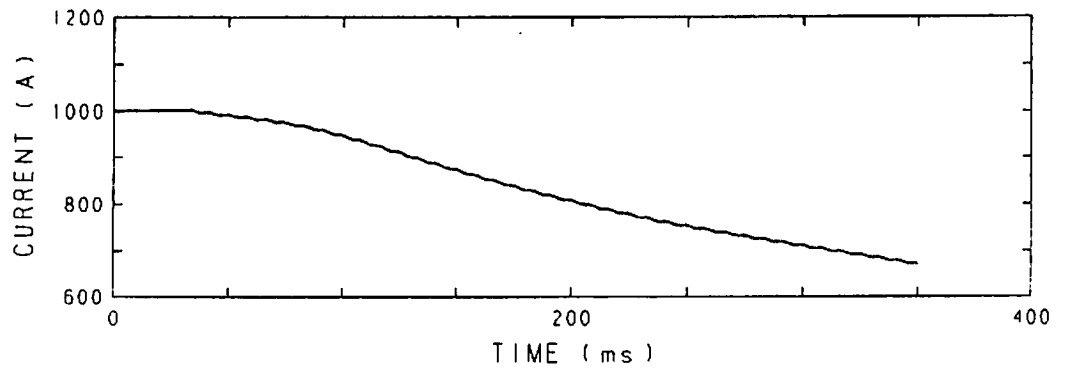
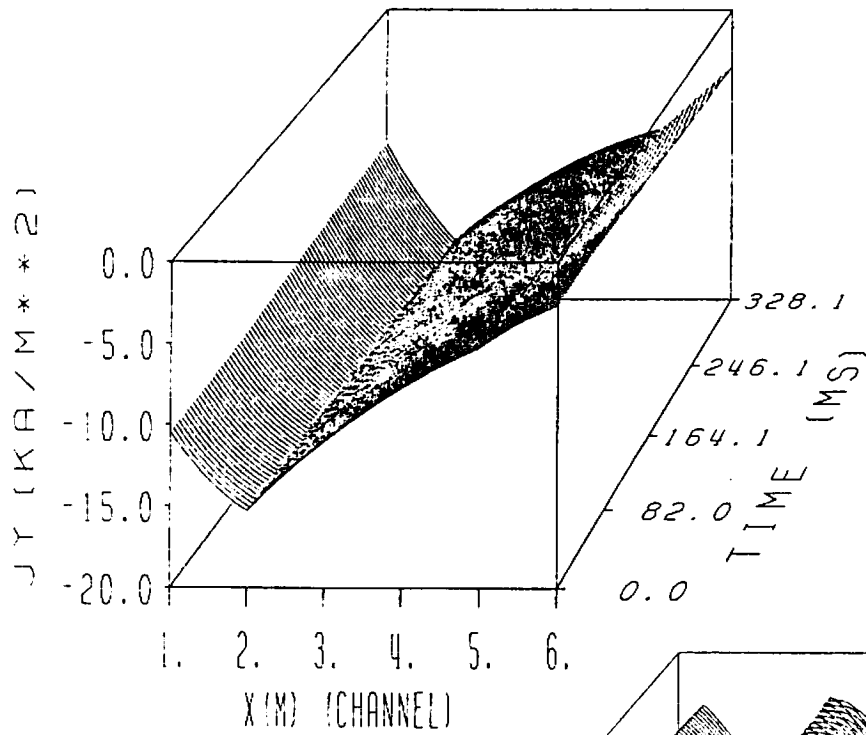


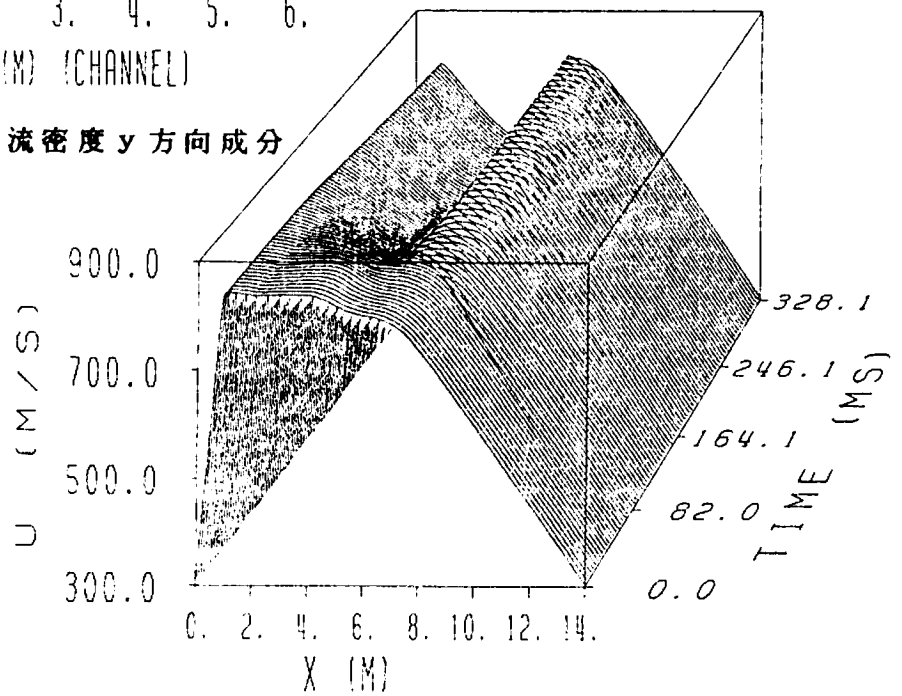
図 3. 3 交流系統一線断線事故の模擬



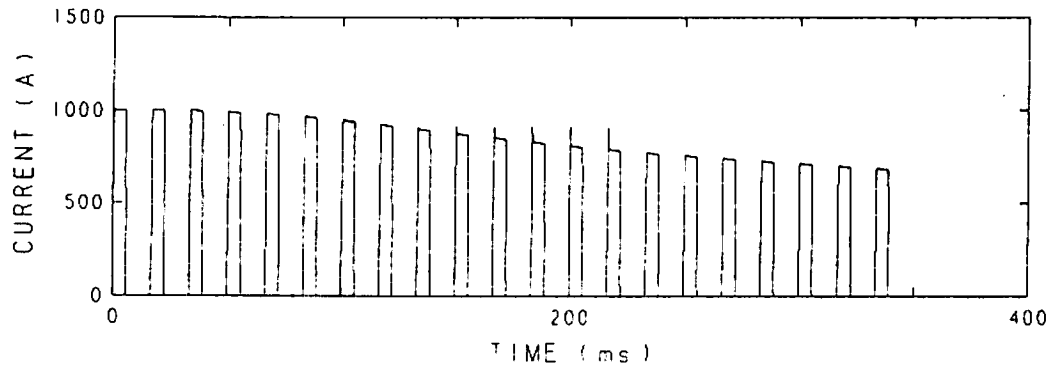
(a) MHD発電機負荷電流



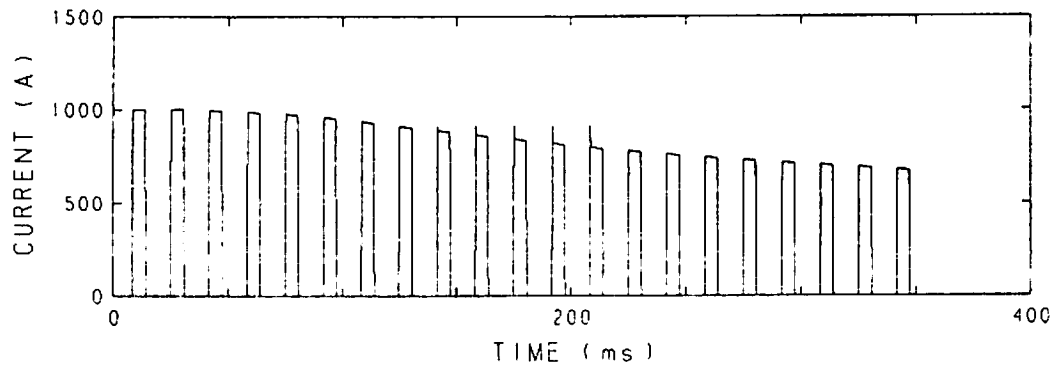
(b) MHD発電機チャンネル内電流密度y方向成分



(c) MHD発電機ダクト内流速分布

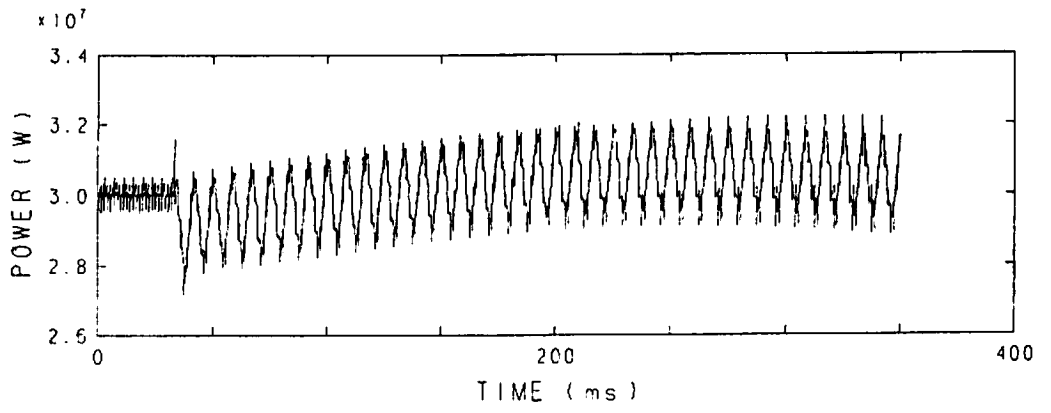


(d)  $S_{B1}$  の電流

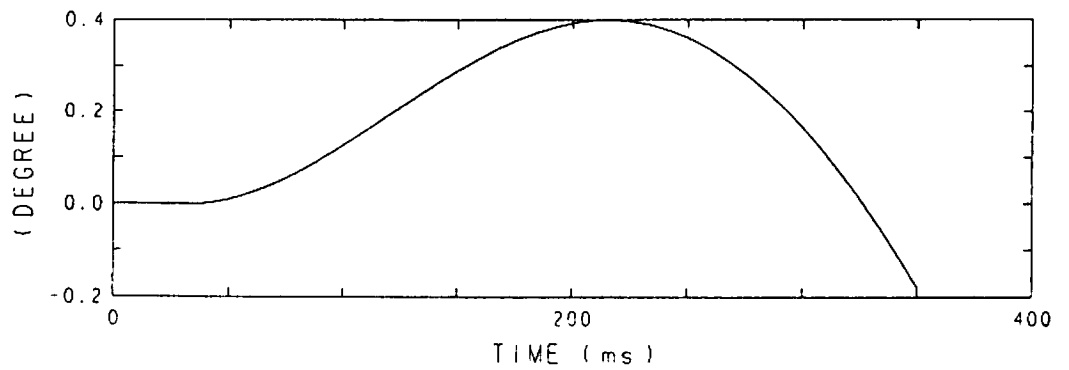


(e)  $S_{B2}$  の電流

図 3. 4 交流系統一線断線事故時の特性

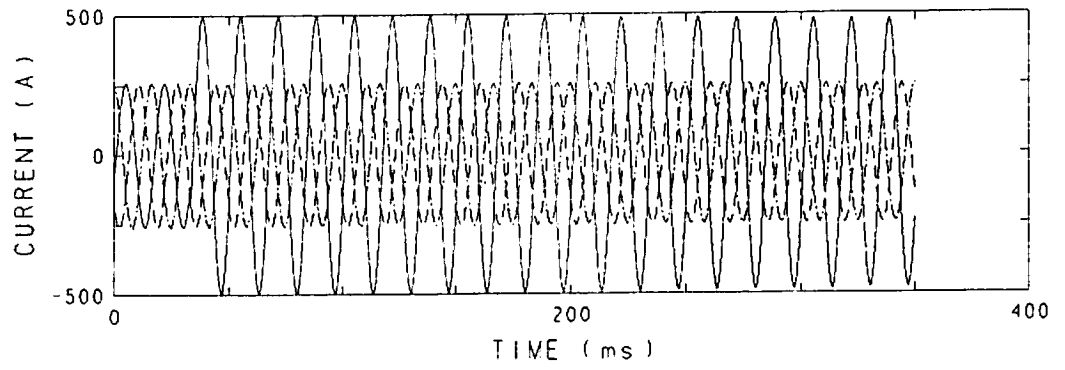


(f) 同期発電機出力

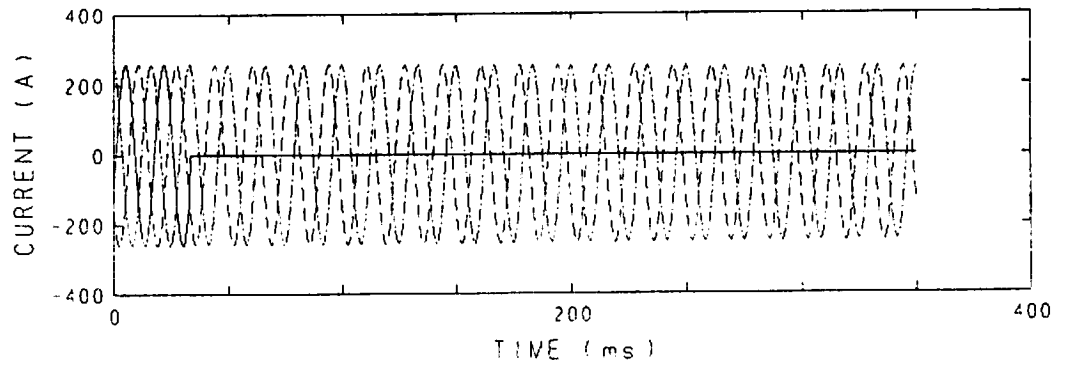


(g) 同期発電機回転子角偏差

図 3. 4 交流系統一線断線事故時の特性

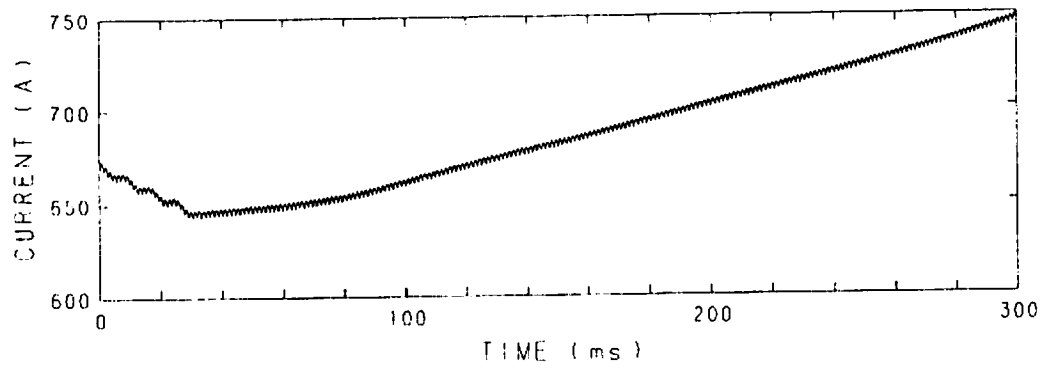


(h) a、b、c相送電線電流

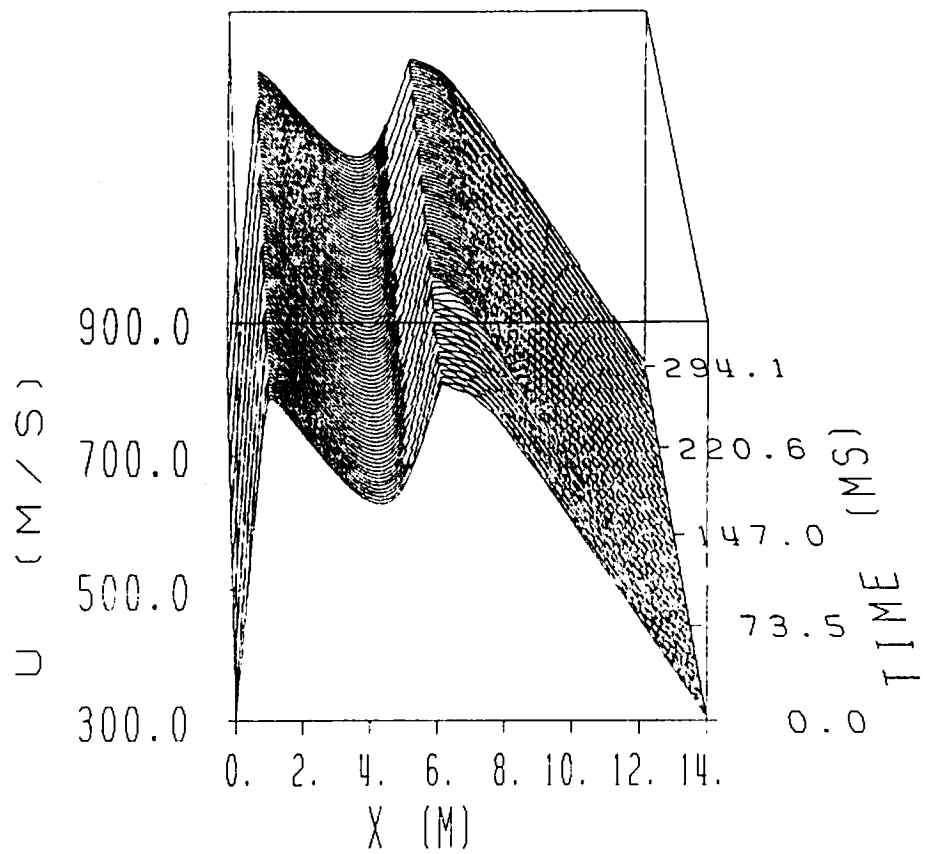


(i) a'、b'、c'相送電線電流

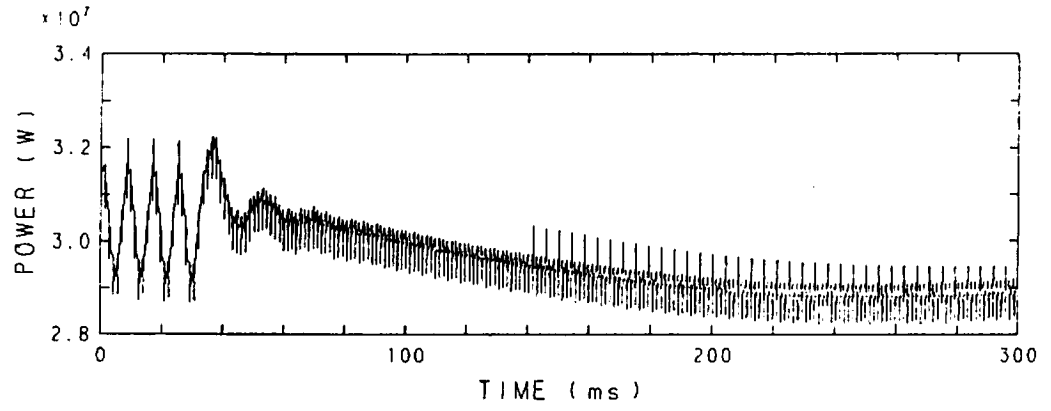
図3. 4 交流系統一線断線事故時の特性



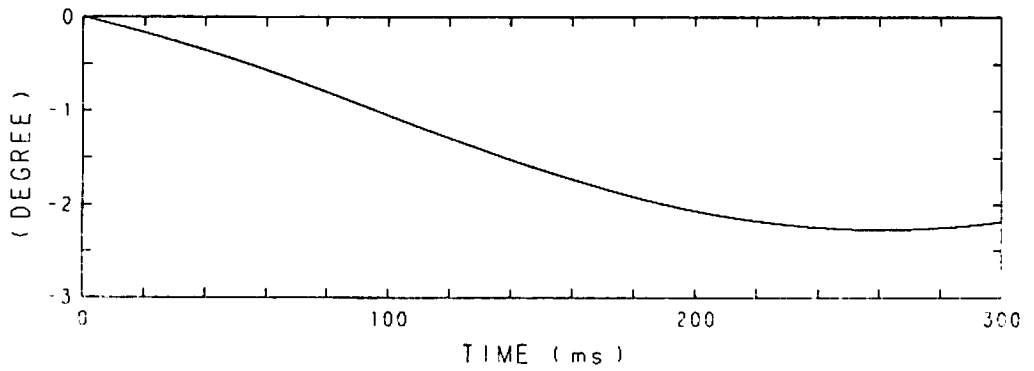
(a) MHD発電機負荷電流



(b) MHD発電機ダクト内流速分布



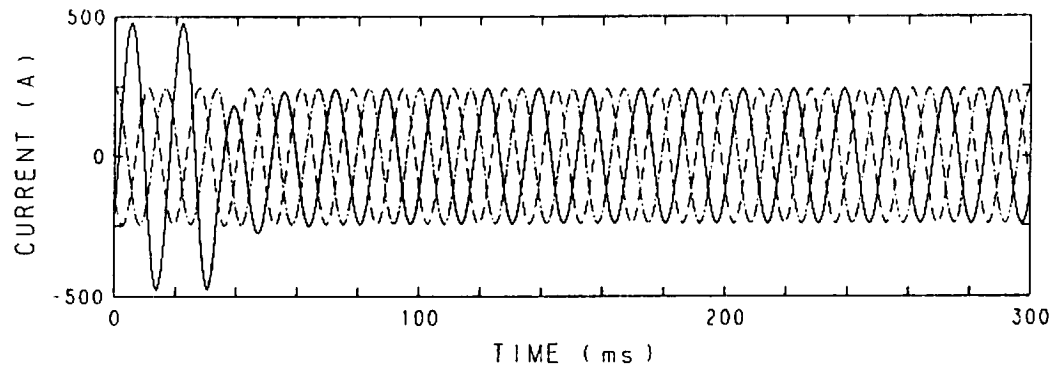
(c) 同期発電機出力



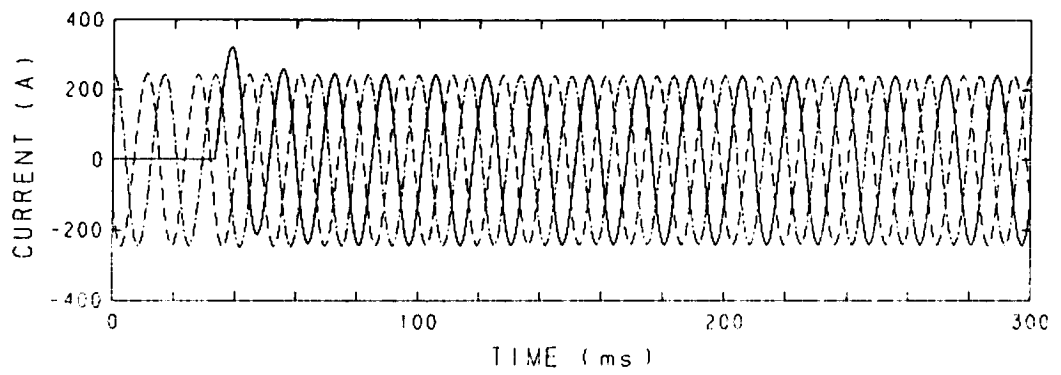
(d) 同期発電機回転子角偏差

図 3. 5 交流系統一線断線事故後の対策





(e) a、b、c 相送電線電流



(f) a'、b'、c' 相送電線電流

図 3. 5 交流系統一線断線事故後の対策

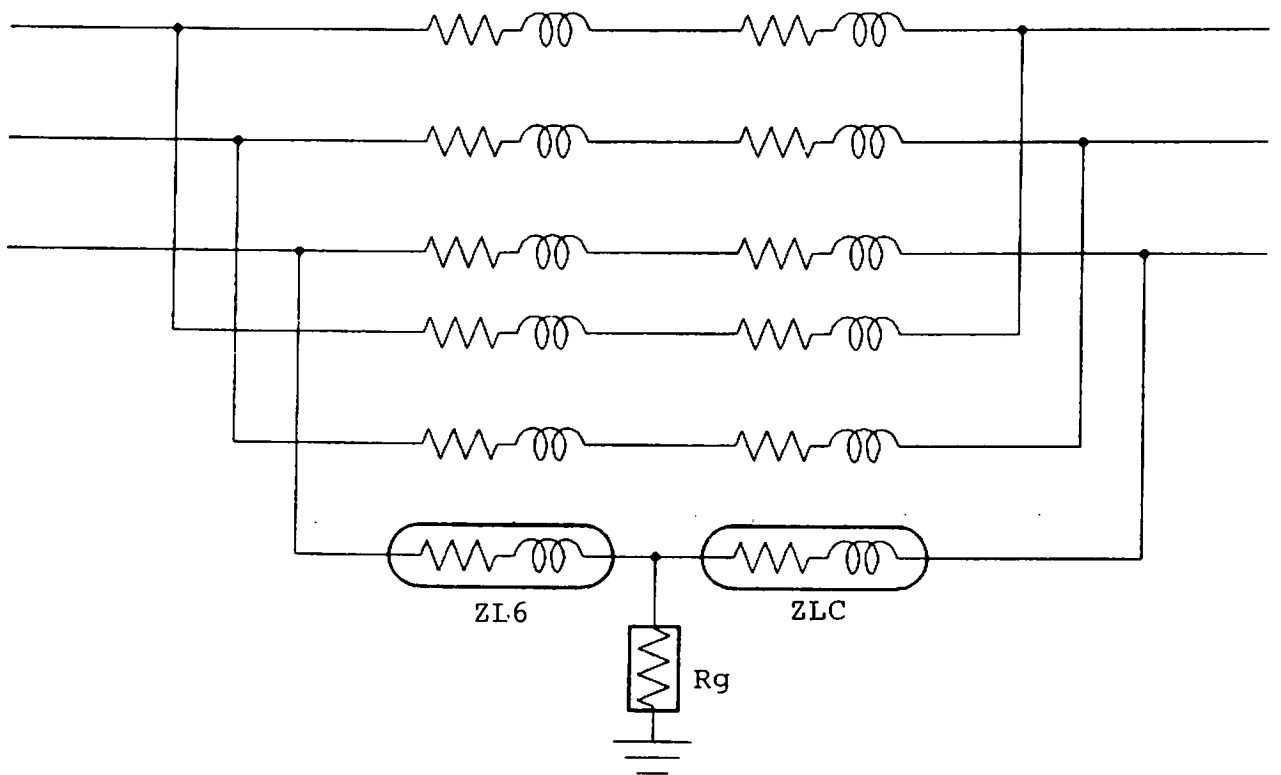
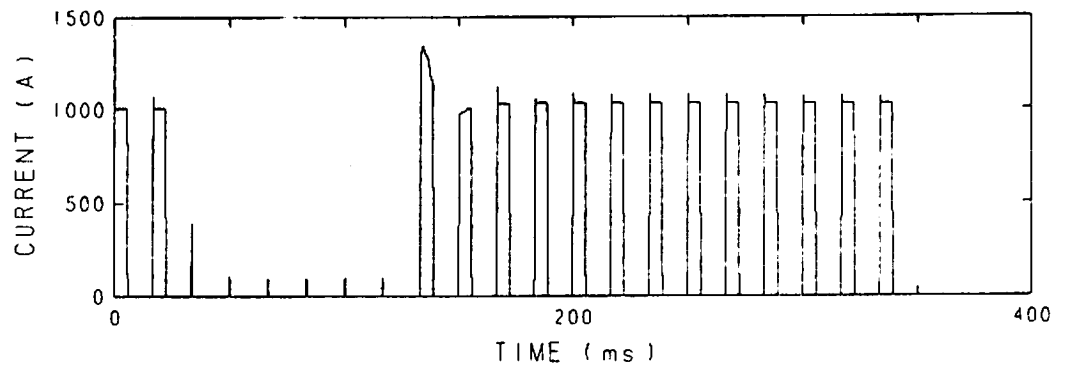
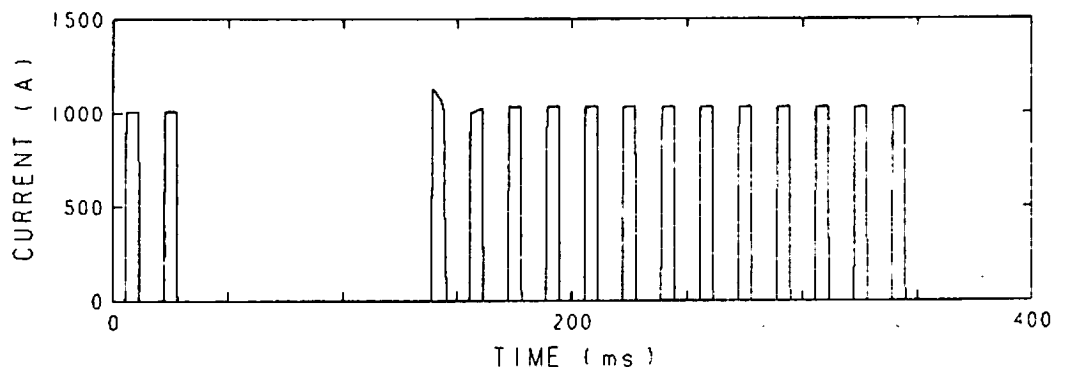


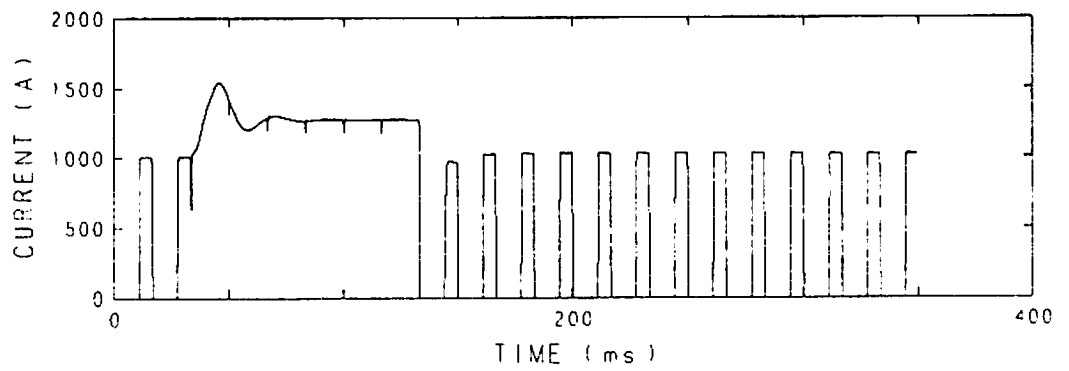
図 3. 6 交流系統一線地絡事故の模擬



S<sub>01</sub>



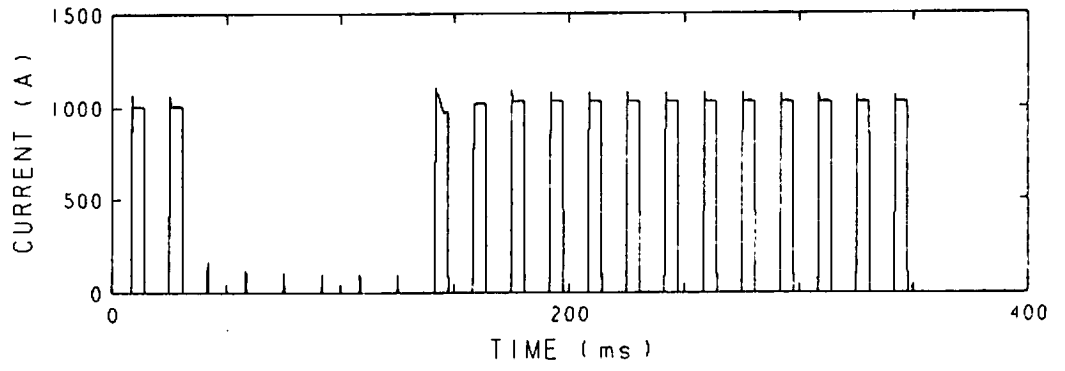
S<sub>03</sub>



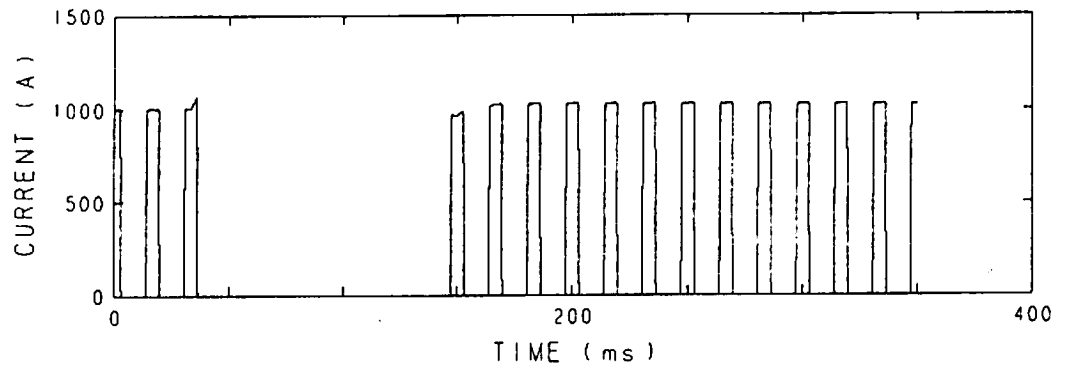
S<sub>05</sub>

(a) サイリスタ電流波形

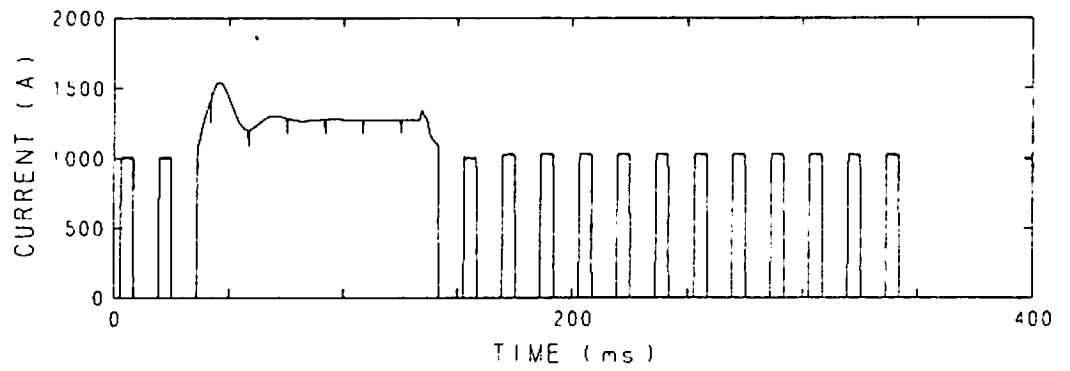
図 3. 7 交流系統一線地絡事故時の特性



S<sub>02</sub>



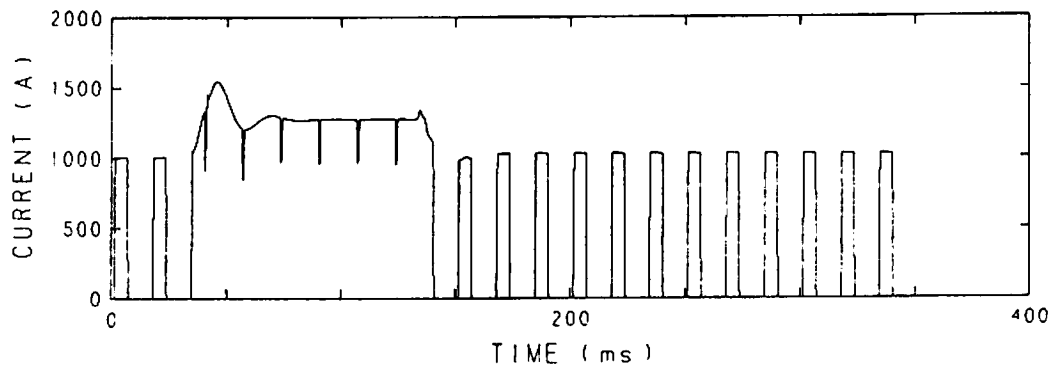
S<sub>04</sub>



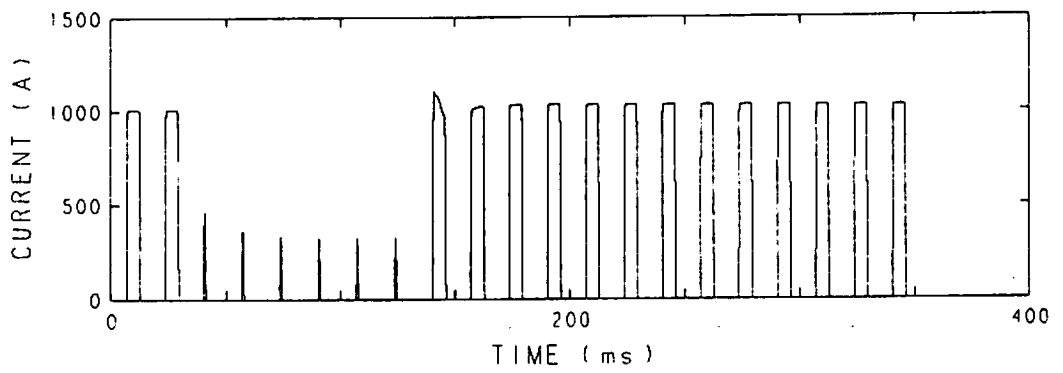
S<sub>06</sub>

(a) サイリスタ電流波形

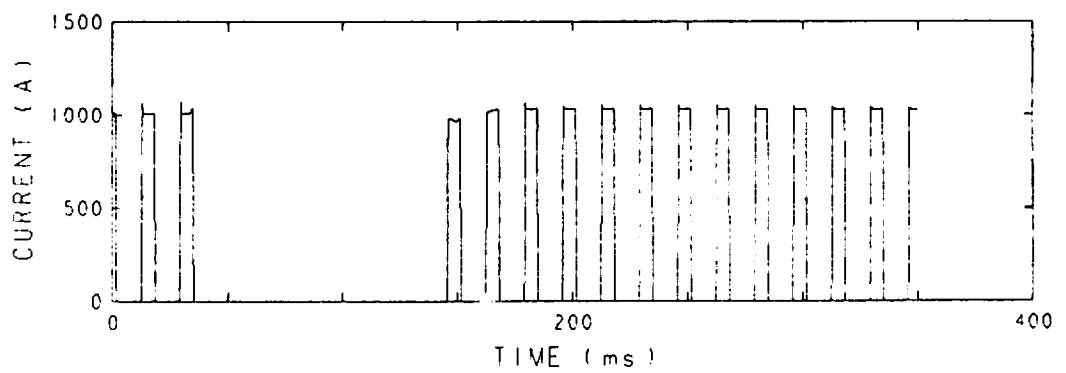
図3. 7 交流系統一線地絡事故時の特性



S<sub>87</sub>



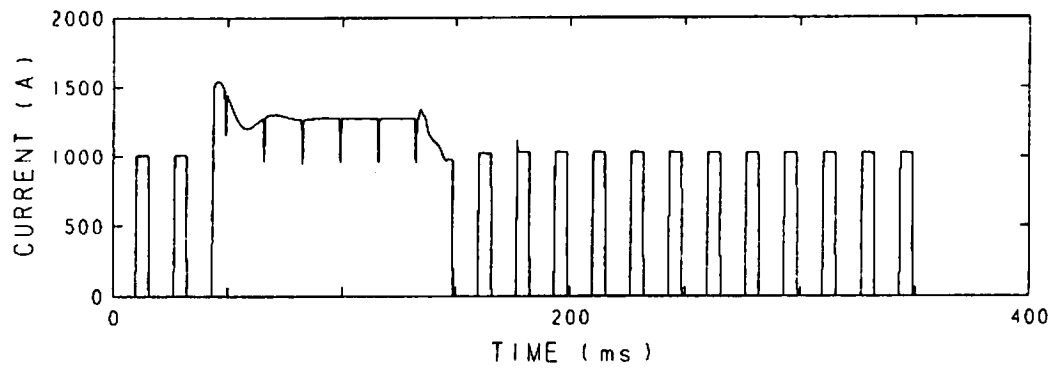
S<sub>89</sub>



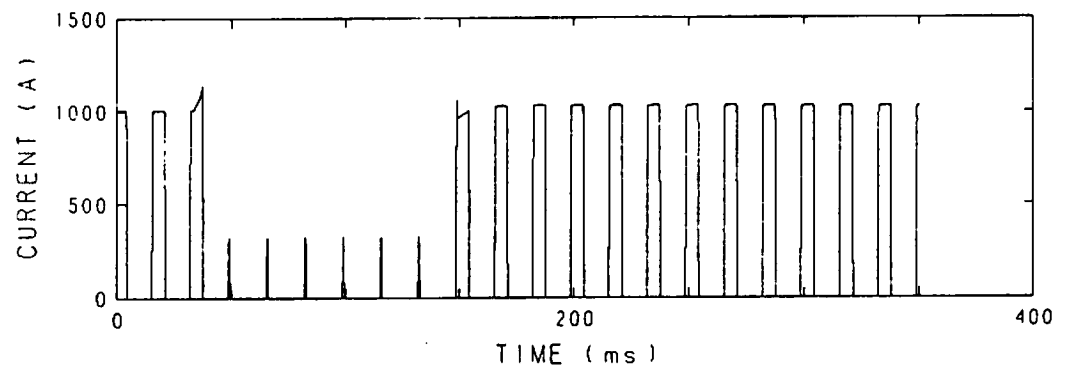
S<sub>11</sub>

(a) サイリスタ電流波形

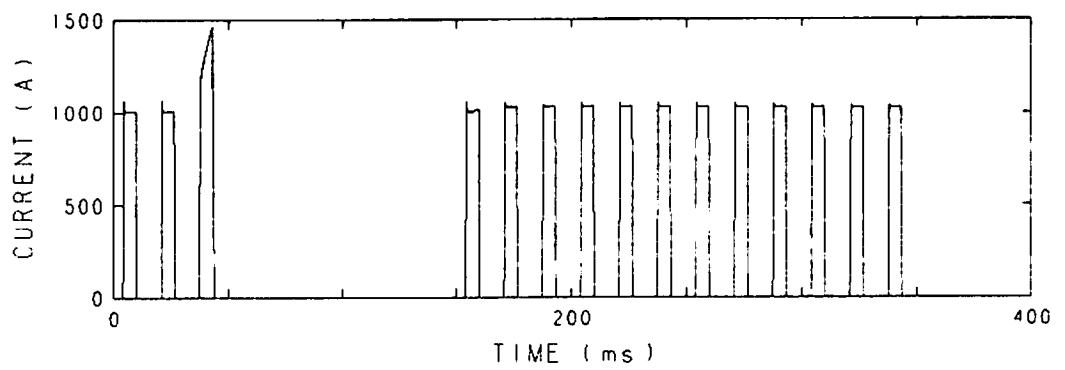
図 3. 7 交流系統一線地絡事故時の特性



S<sub>88</sub>



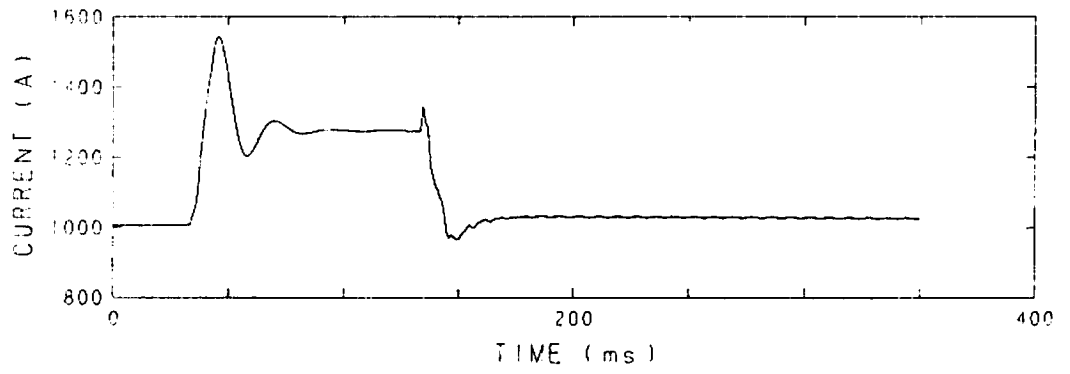
S<sub>10</sub>



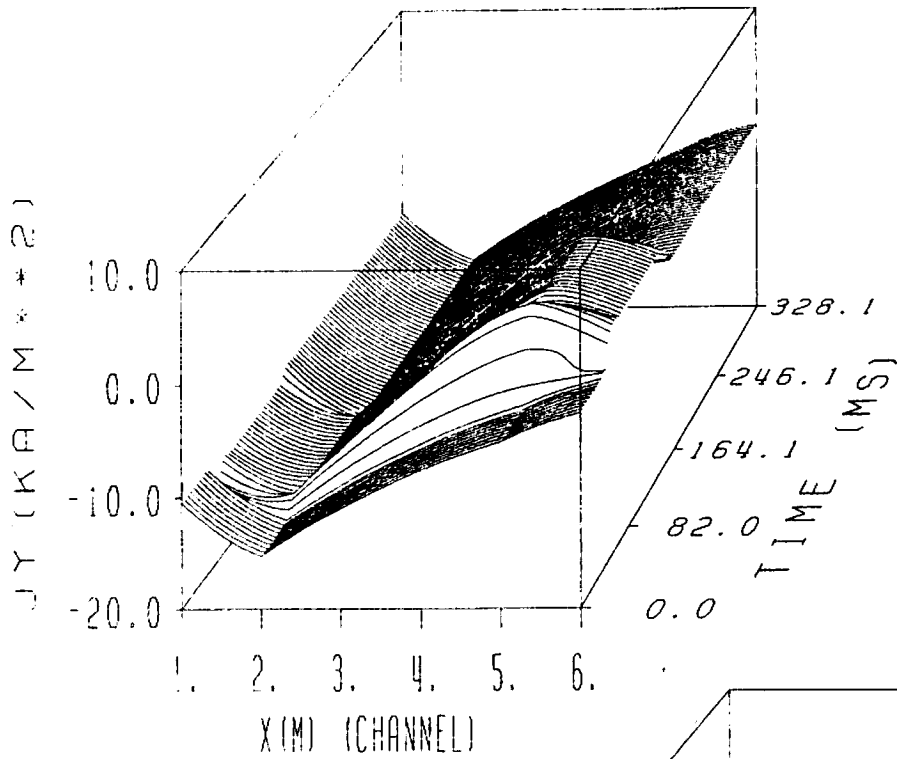
S<sub>12</sub>

(a) サイリスタ電流波形

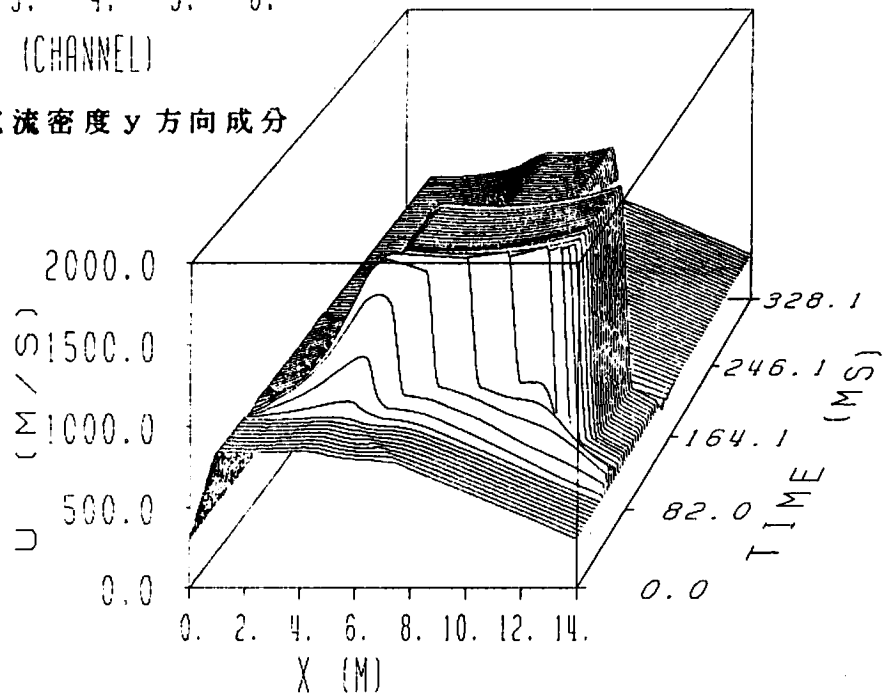
図3. 7 交流系統一線地絡事故時の特性



(b) MHD発電機負荷電流

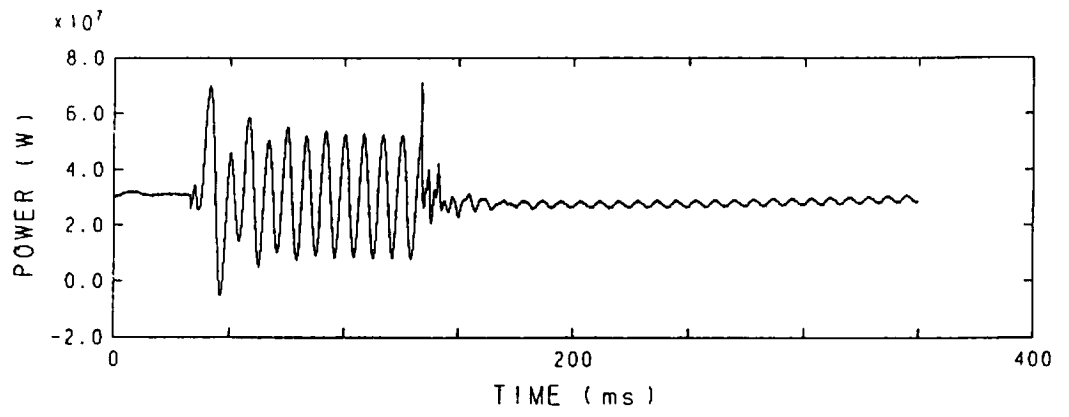


(c) MHD発電機チャンネル内電流密度y方向成分

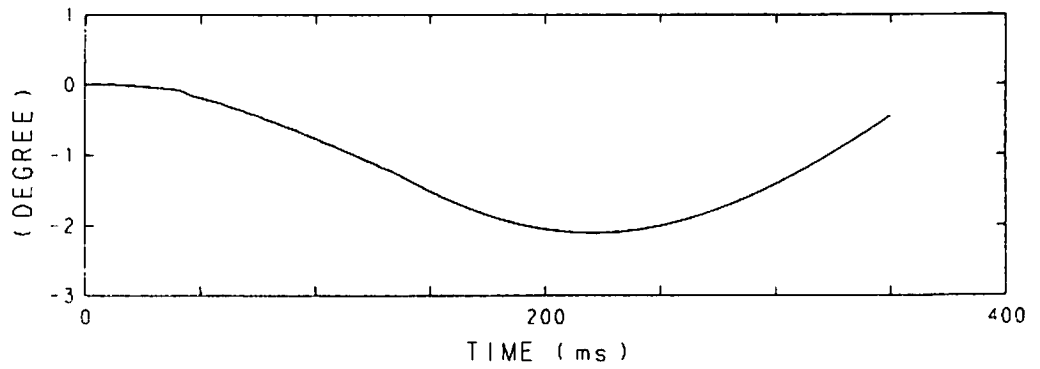


(d) MHD発電機ダクト内流速分布

図3. 7 交流系統一線地絡事故時の特性



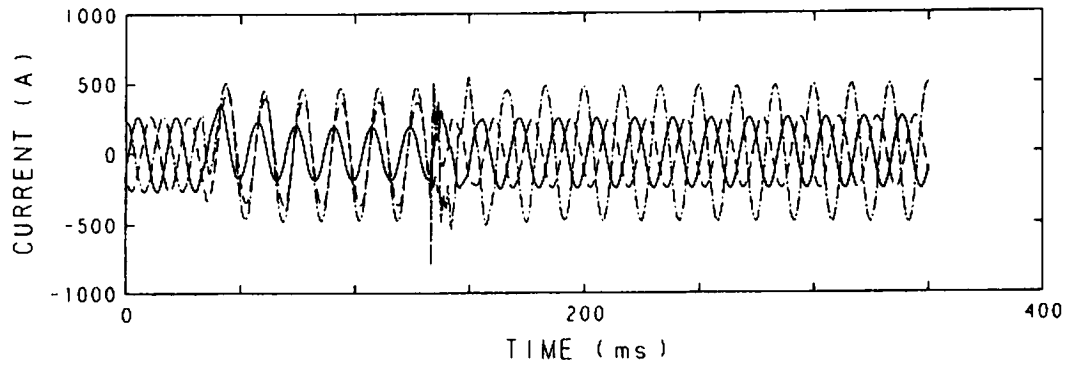
(e) 同期発電機出力



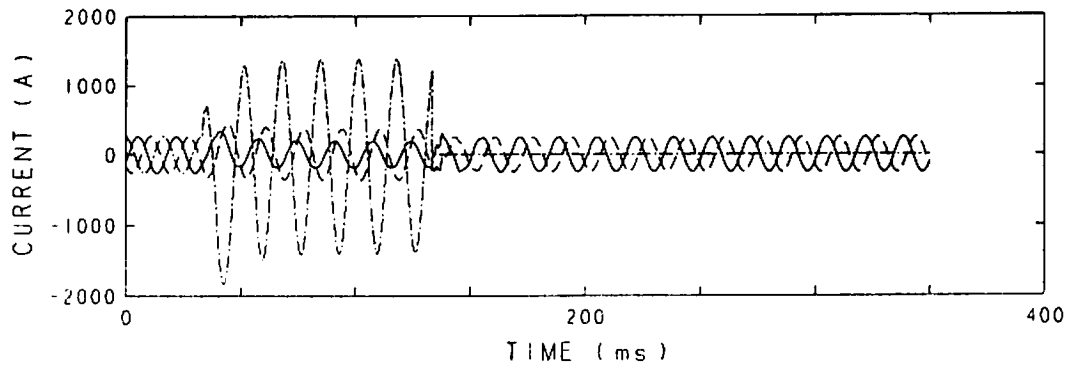
(f) 同期発電機回転子角偏差

図 3. 7 交流系統一線地絡事故時の特性



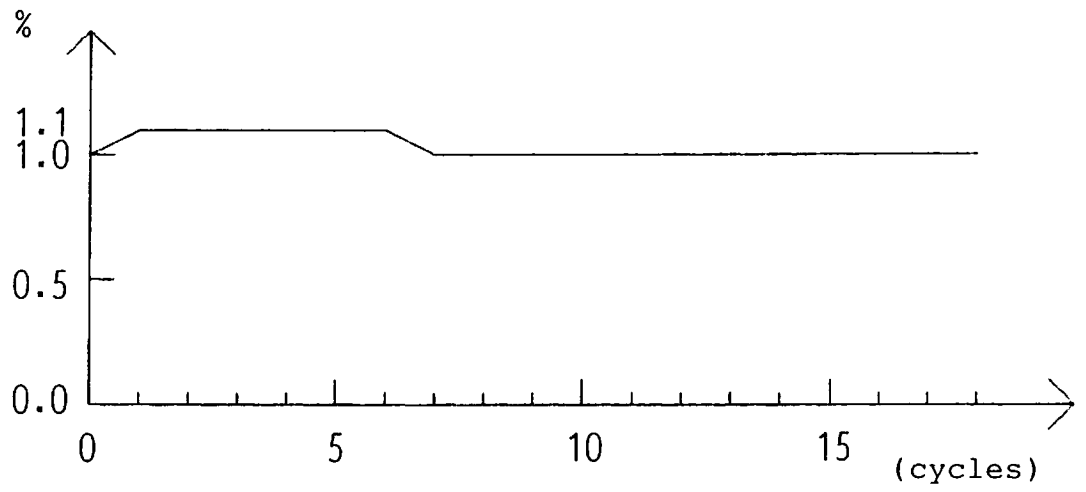


(g) a、b、c 相送電線電流

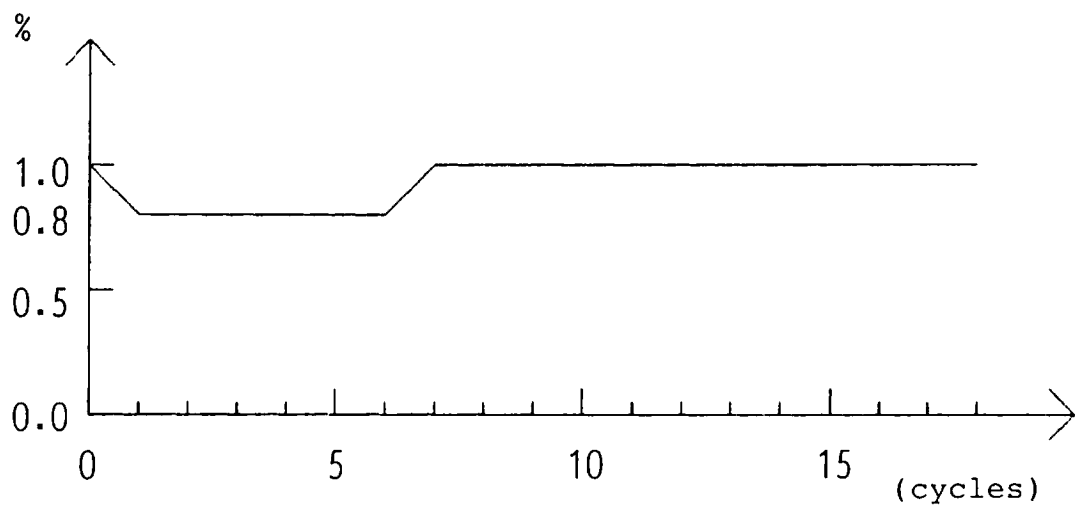


(h) a'、b'、c' 相送電線電流

図 3. 7 交流系統一線地絡事故時の特性

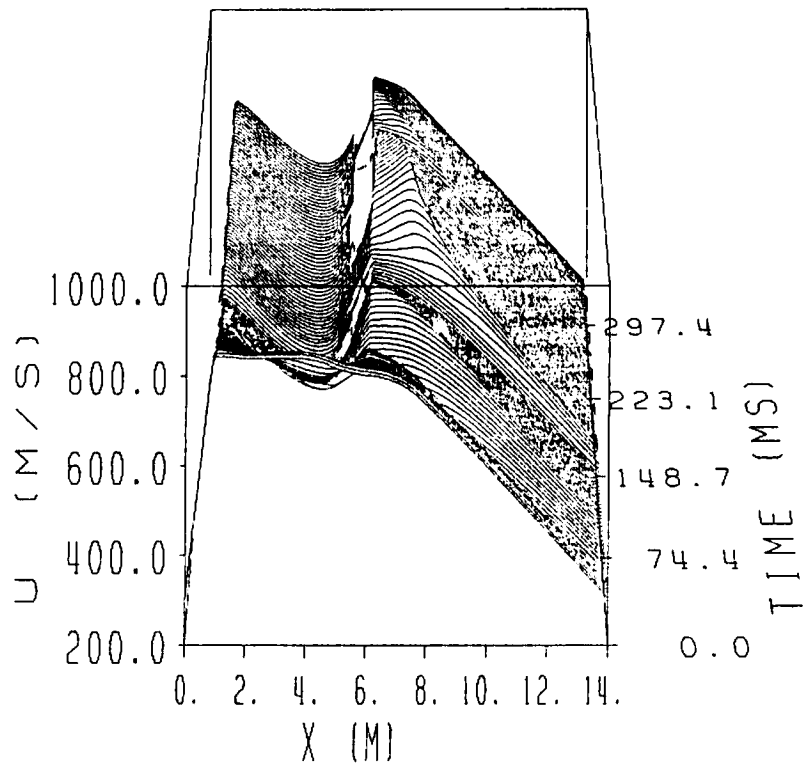


(a) シード率増大時

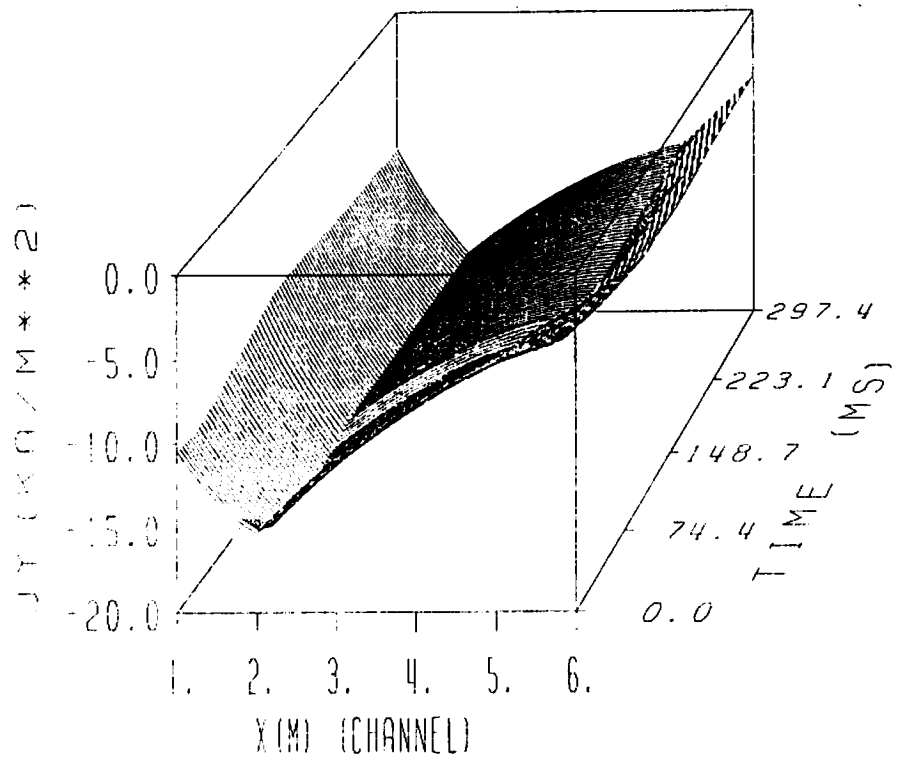


(b) シード率減少時

図 4. 1 シード率変化の想定

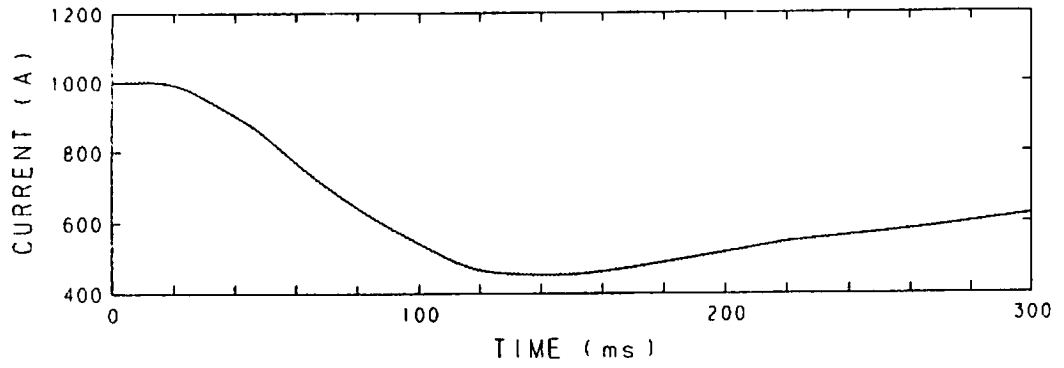


(a) MHD 発電機ダクト内流速分布

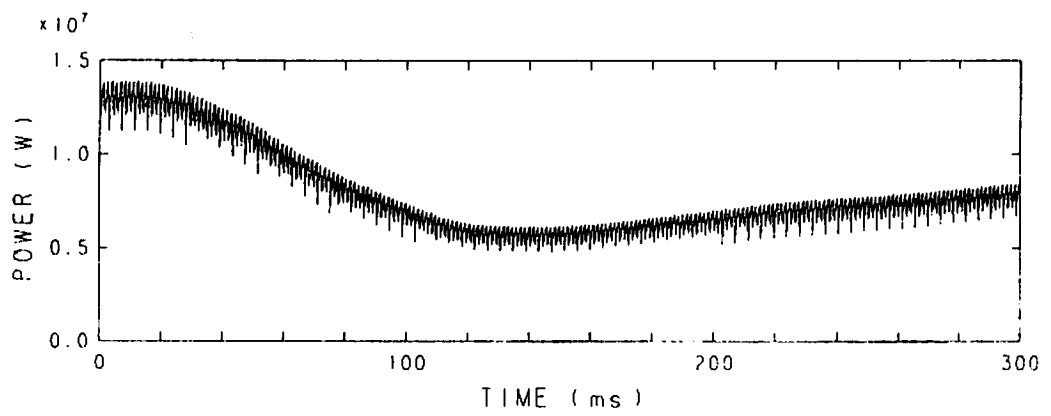


(b) MHD 発電機チャンネル内電流密度 y 方向成分

図 4. 2 シード率増大時の特性

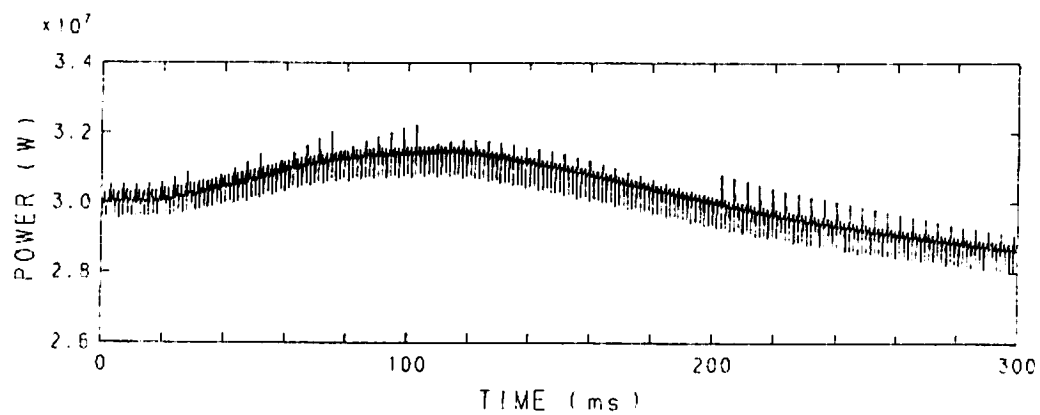


(c) MHD 発電機負荷電流

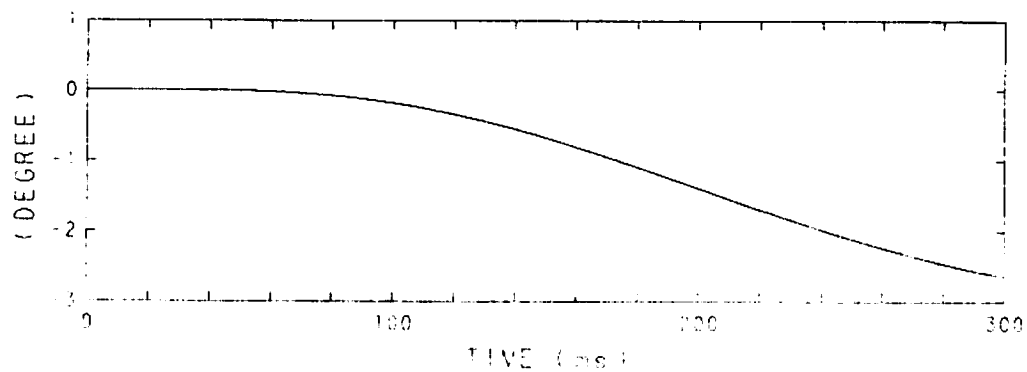


(d) MHD 発電機出力

図 4. 2 シード率増大時の特性

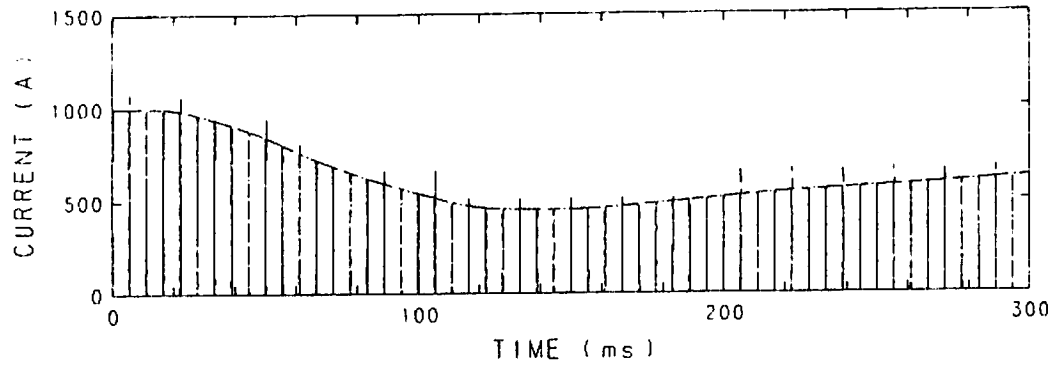


(e) 同期発電機出力

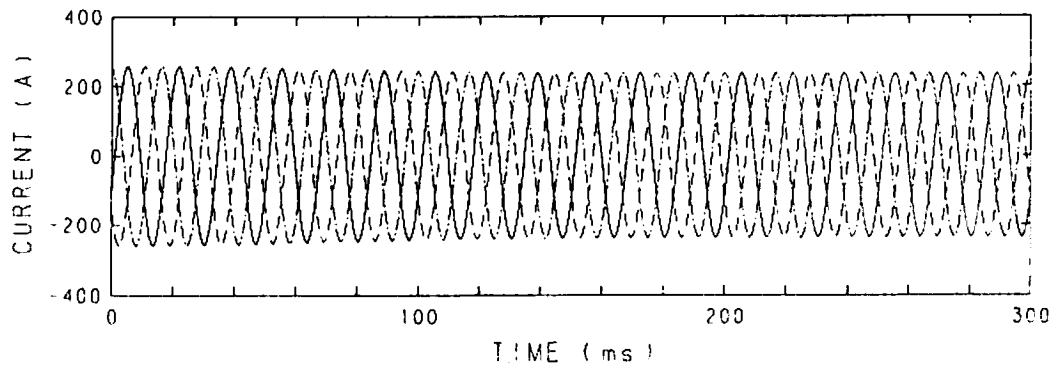


(f) 同期発電機回転子角偏差

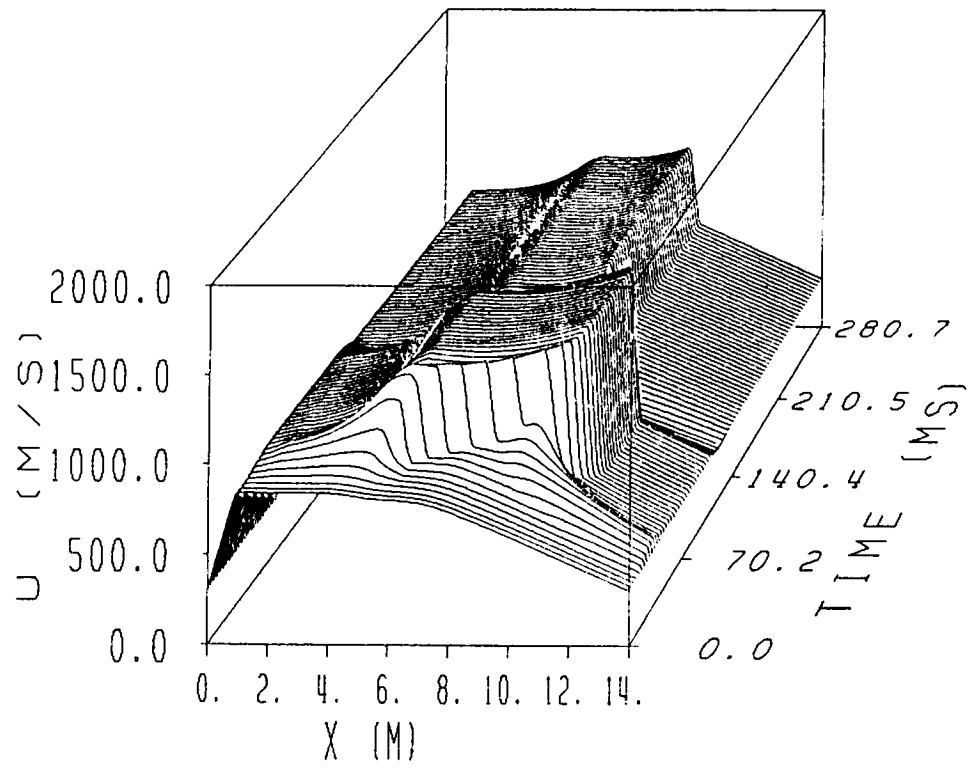
図 4. 2 シード率増大時の特性



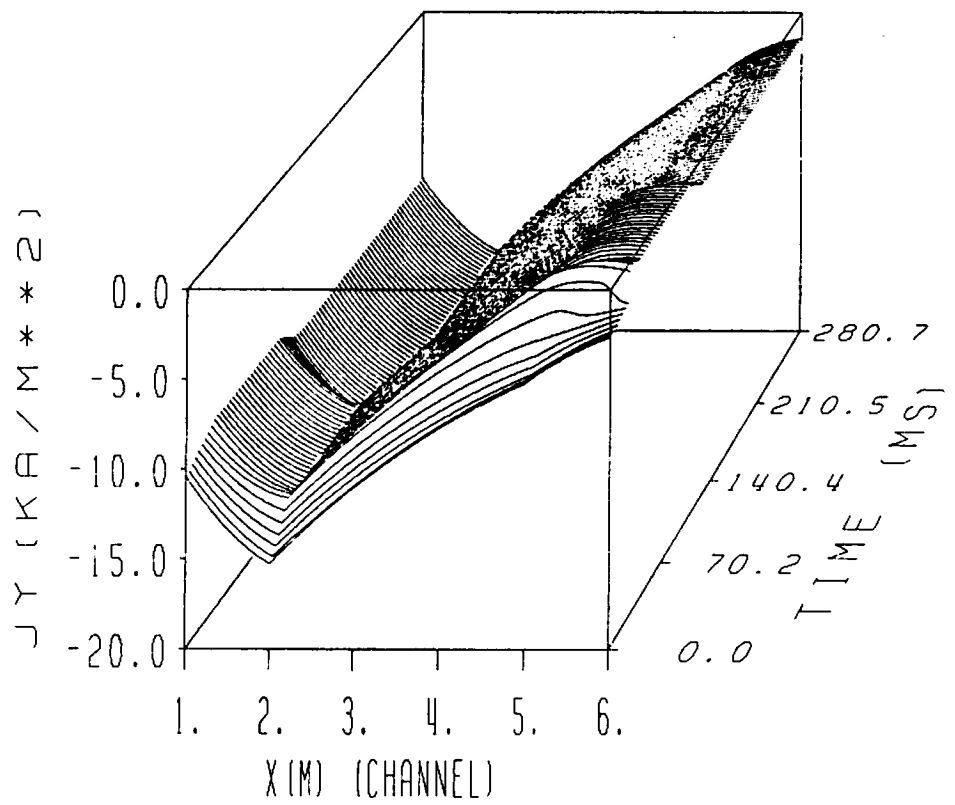
(g)  $S_{01}$ 、 $S_{03}$ 、 $S_{05}$  の電流波形



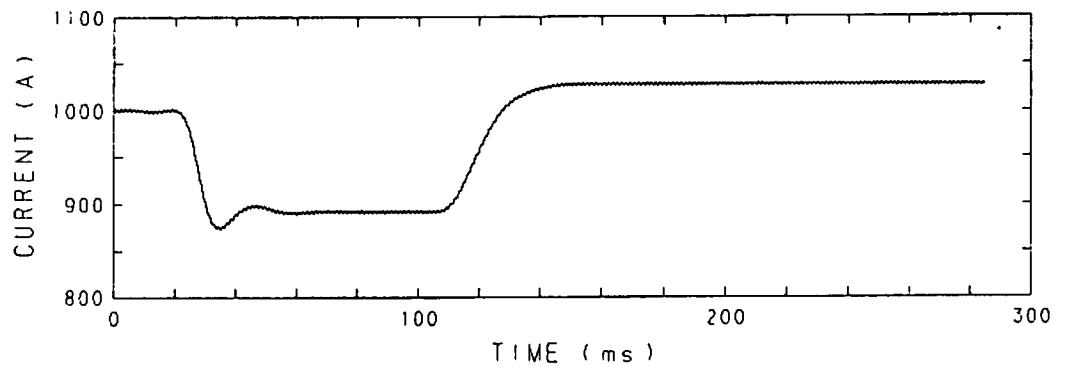
(h) a、b、c 相送電線電流



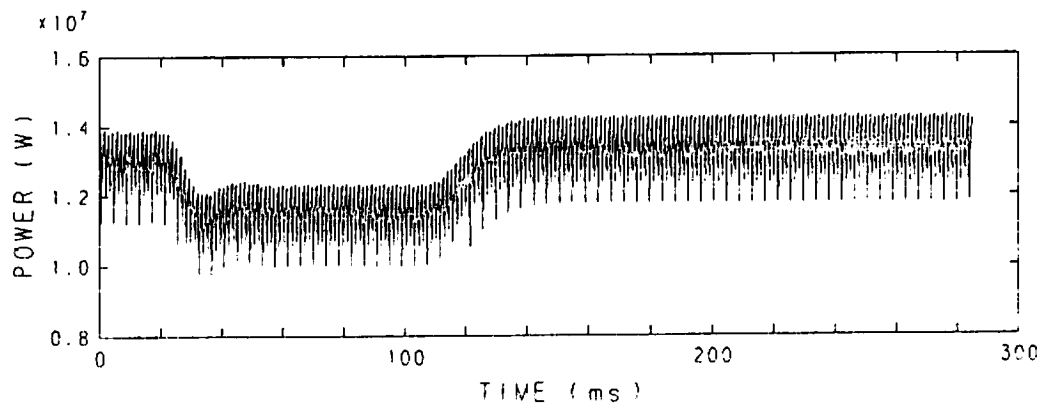
(a) MHD発電機ダクト内流速分布



(b) MHD発電機チャンネル内電流密度y方向成分



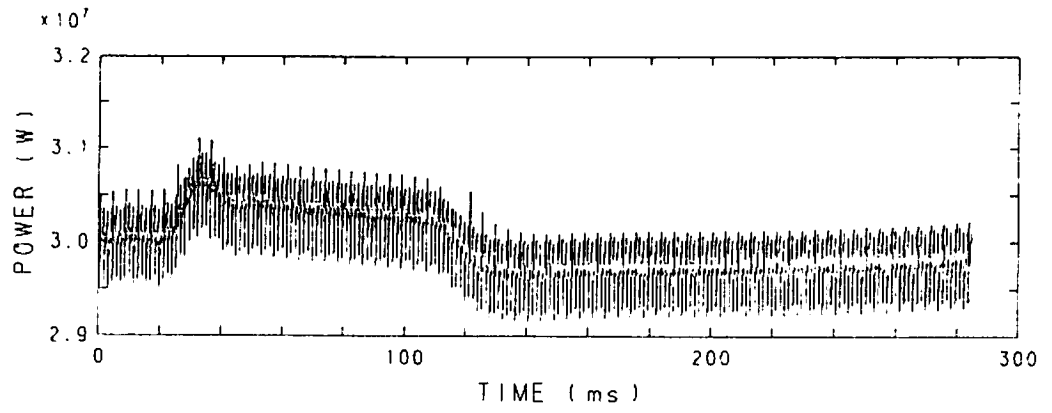
(c) MHD 発電機負荷電流



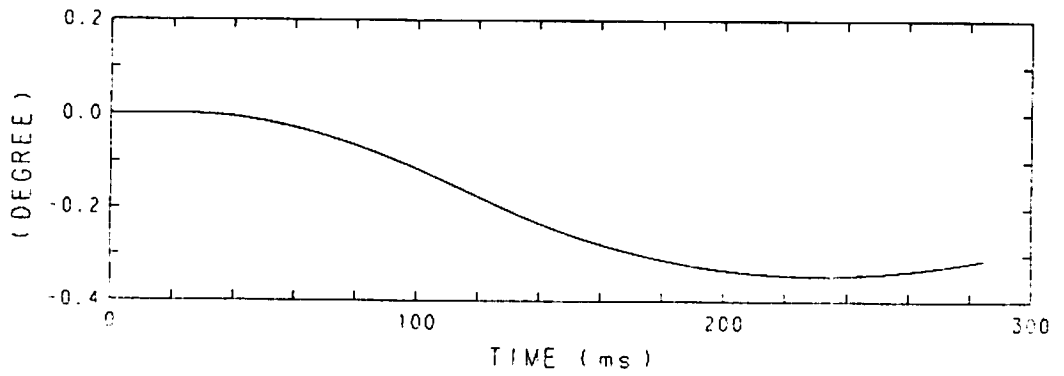
(d) MHD 発電機出力

図 4. 3 シード率減少時の特性



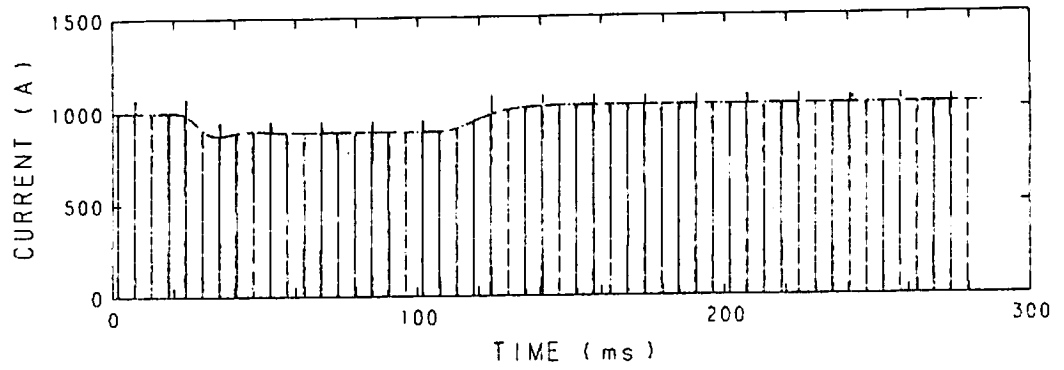


(e) 同期発電機出力

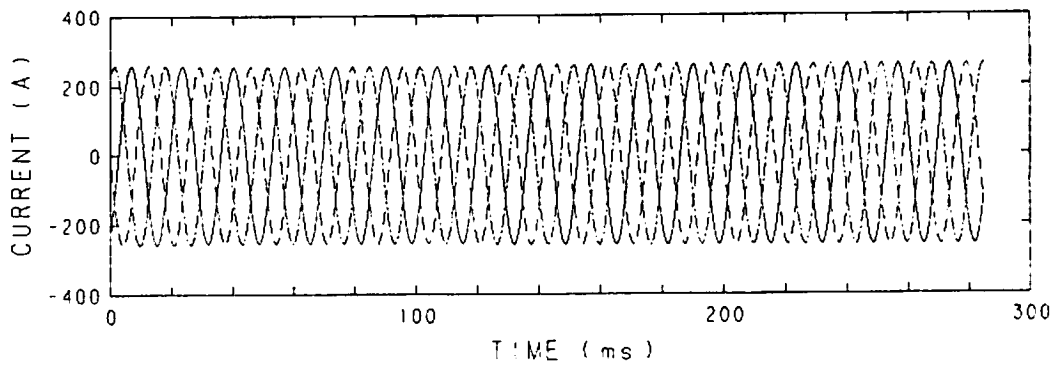


(f) 同期発電機回転子角偏差

図 4. 3 シード率減少時の特性



(g)  $S_{01}$ 、 $S_{03}$ 、 $S_{05}$  の電流波形



(h) a、b、c 相送電線電流

図 4. 3 シード率減少時の特性