

特別研究報告書

交流系統に接続したMHD発電機—
自励式インバータシステムの特性解析

京都大学工学部電気工学科

三好 誠司

昭和61年2月19日

目次

序論	1
本論	2
第1章 解析手法	2
§1-1 MHD発電機の基礎方程式、諸量	2
§1-2 MHD発電機とインバータの接続	5
§1-3 解析に用いる回路	5
§1-4 事故解析の方法	7
第2章 解析結果と考察	8
§2-1 インバータの点弧時期と導通期間	8
§2-2 システムの定常特性	9
§2-3 点弧時期によるシステム制御の解析	10
§2-4 導通期間によるシステム制御の解析	12
§2-5 事故時の特性解析	12
(1) インバータの点弧失敗事故時の特性	13
(2) インバータの転流失敗事故時の特性	14
(3) 交流システムの1線地絡事故時の特性	15
(4) 交流システムの2線短絡事故時の特性	15
(5) 交流システムの1線断線事故時の特性	16
結論	18
謝辞	19
参考文献	20
付録	

序論

石油や石炭のような化石燃料の有効利用は、現代社会においては非常に重要な課題である。そこで、注目されている方法のひとつに、MHD発電がある。

MHD発電の原理は、ファラデーの電磁誘導の法則である。すなわち磁界中を導体が運動することにより生ずる起電力を利用するのであるが、導体として銅線ではなく、導電性のある高温ガスプラズマを用いる点が特徴である。

このMHD発電により発生する電力は直流電力なので、その電力を商用送配電系統などの交流系統に供給する場合、インバータ¹⁾²⁾によって直流交流変換をする必要がある。

インバータのスイッチング素子としては、半導体素子のひとつであるサイリスタが多用される。サイリスタは、順方向電圧が加えられている状態で、ゲートに点弧パルスを加えると点弧する。点弧しているサイリスタを消弧するには、逆方向電流を流さなくてはならない。このため、サイリスタを点弧することは容易であるが、消弧することは比較的難しい。この点から、サイリスタブリッジインバータは大きく二種類に、分けられる。一方は他励式インバータであり、他方は自励式インバータである。他励式インバータは、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ある。構造が単純であり、従って素子の数が少なく動作が安定している等の利点があるため、他励式インバータは現実にも多く稼働している。これに対して自励式インバータは、内部に消弧用回路を持っているので、構造は複雑であり、素子の数も多くが必要である。さらに、点弧及び消弧の複雑な動作を正確に行わなければならない。しかし、自励式インバータには、供給する電力（周波数や出力電力）を制御しやすく、また無効電力を補償する機能があるなど長所もまた多い。本研究では、直流交流変換装置としてこの自励式インバータを採用した。

本研究の目的は、超音速ダイアゴナル型MHD発電機、自励式インバータ、及び三相無限大母線を接続した連係システムについて、定常時の特性を数値シミュレーションによって得ることと、さらにさまざまな事故時の特性を数値シミュレーションによって得ることである。

本論

第1章 解析手法

§1-1 MHD発電機の基礎方程式、諸量

本研究で用いたMHD発電機は、序論においても述べたように単一負荷超音速ダイアゴナル型MHD発電機である。MHD発電機チャンネルの内部では、強磁場中を導電性流体が高速で通過するため、その内部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扱わなければならない。さらに、外部負荷回路にインバータなどを含み、かつ各種事故解析を試みるため、非定常な場合にも用いることのできる解析を行う必要がある。

以下に、本研究で用いた基礎方程式を、その内容より(a)~(d)の4つに分けて書く(なお本研究では一次元近似を仮定している)³⁾。

(a) 質量、運動量、エネルギーの保存則

作動流体に対する基礎方程式は以下の3つである。

$$\text{質量保存式} \quad \frac{\partial}{\partial t}(PA) + \frac{\partial}{\partial x}(PvA) = 0 \quad (1-1.1)$$

$$\text{運動量保存式} \quad \frac{\partial}{\partial t}(PvA) + \frac{\partial}{\partial x}(Pv^2A) + A \frac{\partial p}{\partial x} - AJ_y B + f = 0 \quad (1-1.2)$$

$$\text{エネルギー保存式} \quad \frac{\partial}{\partial t} \left\{ P \left(\epsilon + \frac{v^2}{2} \right) A \right\} + \frac{\partial}{\partial x} (Pv h_0 A) - (\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}) A + q = 0 \quad (1-1.3)$$

(b) マックスウェル(Maxwell)の方程式と電流の連続式

本研究では、作動流体としては弱電離プラズマを扱っており電気的中性はよく保たれている。また誘導磁界は無視する。そうすると、マックスウェルの電磁方程式および電流の連続式は次のようになる。

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1-1.4)$$

(c) 一般化されたオームの法則

本研究で扱う作動ガスでは、イオンスリップ効果が無視できるので一般化されたオームの式としては次式を用いる。

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{\beta}{B} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \quad (1-1.5)$$

(d) ダイアゴナル条件式

無限電極分割を仮定すると、ダイアゴナル型では次式のような関係が成り立つ。

$$(J_x - a J_y) A = I_L \quad (1-1.6)$$

$$E_y = -a E_x \quad (1-1.7)$$

$$a = \cot \phi \quad (1-1.8)$$

ただし、上の (a)~(d) で、

A : ダクト断面積、
ρ : ガス圧力、
β : ホール係数、
σ : 導電率、
ε : ガスの内部エネルギー、
h₀ : トータルエンタルピー、
J = (J_x, J_y, 0) : 電流密度、
E = (E_x, E_y, 0) : 電界、
B : 磁束密度、
また、v = |v|、B = |B|、

ρ : 質量密度、
f : 摩擦損失、
I_L : 負荷電流、
φ : ダイアゴナル角、
v : 作動流体速度、
q : 熱損失、

以上の式をマコーマック(MacCormack)の方法⁴⁾を用いて解く。

さてここで、本研究で用いた単一負荷ダイアゴナル型MHD発電機の諸量を挙げておく。

熱入力 $P_1 = 111 \text{ MW}$ 、質量流量 $m_0 = 25 \text{ Kg/s}$ 、
 ダクト長 $l = 5 \text{ m}$ 、ダクト入口圧力 $p_0 = 2.1 \text{ atm}$ 、
 ダクト入口温度 $T_0 = 2550 \text{ K}$ 、ダクト入口流速 $u_0 = 1100 \text{ m/s}$ 、
 総温 $T_{s0} = 2800 \text{ K}$ 、総圧 $p_{s0} = 4.5 \text{ atm}$ 、
 ダクト入口マッハ数 $M_0 = 1.18$

磁場の分布 $\left\{ \begin{array}{l} B = 2.0 + 2.8x \quad (0 \text{ m} \leq x \leq 1 \text{ m}) \\ B = 4.8 - 0.37(x-1) \quad (1 \text{ m} \leq x \leq 4 \text{ m}) \\ B = 3.7 - 1.7(x-4) \quad (4 \text{ m} \leq x \leq 5 \text{ m}) \end{array} \right.$

ダクト壁等価砂粒径 $k_s = 3 \text{ mm}$
 電極電圧降下 $\Delta = 20 \%$
 G-factor $G = 1.6$
 等価壁温 $T_w = 1400 \text{ K}$
 リーク抵抗 $R = 100 \text{ } \Omega / \text{m}$
 ダイアゴナル角 $\phi = 45^\circ$

上記より、MHD発電機の発電特性は以下の通りである。

電気出力 $w = 10.5 \text{ MW}$
 熱損失 $P_1 = 9.3 \text{ MW}$
 エンタルピー効率 $\eta = 9.46 \%$
 負荷電流 $I_L = 820 \text{ A}$
 開放電圧 $V_0 = 25.4 \text{ kV}$
 短絡電流 $I_s = 1.65 \text{ kA}$
 内部抵抗 $R_i = 15.4 \text{ } \Omega$
 負荷抵抗 $R_L = 15.6 \text{ } \Omega$
 負荷率 $(V_0 - R_i I_L) / V_0 = 0.50$

なお、本研究では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%)したものをを用いているが、このような燃焼ガスに対する σ 、 β は次式によってに近似的に表せることが報告されている⁵⁾。

$$\sigma = c p^m T^n \exp(-T_1/T) \quad (1-1.9)$$

ここで、

$$c = 8.99 \times 10$$

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

$$n = 1.055$$

$$T_1 = 2.5191 \times 10^4$$

$$\beta = c' B p^{m'} T^{n'} \quad (1-1.10)$$

ここで、

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

$$m' = -9.904 \times 10^{-1}$$

$$n' = 9.7008 \times 10^{-1}$$

§ 1-2 MHD 発電機とインバータの接続

本研究においては、インバータ側のシステム(インバータ-変圧器-送電線-無限大母線)を直流電圧源と、その内部抵抗により立ち上げ、その後(本研究の解析においては、運転開始 15ms 後)それらを MHD 発電機起電力、MHD 発電機内部抵抗におきかえる手法を用いている。

§ 1-3 解析に用いる回路

解析に用いる回路を図1-3.1に示す。自励式インバータとしては、マクマリー(McMurray)型ダブルサイリスタブリッジを採用し、MHD 発電機側の変圧器としては、高周波分を低減させるために、Y-Y、Y- Δ 結線を採用した。

各素子の働きについて、以下に簡単に説明する。

V : 直流定電圧源

Z_v : 内部抵抗 (直流リアクトルD.C.L.を含む)
 C_a, C_b : 分圧用コンデンサ
 $M_1 \sim M_{12}$: メインサイリスタ
 $S_1 \sim S_{12}$: 転流用サイリスタ
 $D_1 \sim D_{12}$: フィードバックダイオード
 $C_1 \sim C_6$: 転流用コンデンサ
 $L_1 \sim L_6$: 転流用リアクトル
 $L_{M1} \sim L_{M12}$: 陽極リアクトル
 $Z_1 \sim Z_6$: 平滑リアクトル
 $T_1 \sim T_{12}$: 三相理想変圧器巻線
 $Z_7 \sim Z_{12}$: 変圧器漏れインピーダンス
 $Z_{L1} \sim Z_{L6}$: 送電線インピーダンス
 $Z_{13} \sim Z_{15}$: 三相無限大母線側変圧器漏れインピーダンス
 Z_{fa}, Z_{fb}, Z_{fc} : 高調波除去フィルター (抵抗、リアクトル)
 C_{fa}, C_{fb}, C_{fc} : 高調波除去フィルター (キャパシタンス)
 $E_1 \sim E_3$: 三相平衡無限大母線
 R_0, R_1, R_2 : 接地抵抗
 R_{s1}, R_{s2} : 交流系統短絡事故用抵抗 (後述 §1-4)
 R_g : 交流系統地絡事故用抵抗 (同上)

次に、この回路の諸量を挙げる。

V : 25.43 kV (MHD発電機接続前)
 Z_v : 15.41 Ω (同上)
 C_a, C_b : 500 μF
 $M_1 \sim M_{12}$: 0.01 Ω (導通時)、 $10^7 \Omega$ (遮断時)
 $S_1 \sim S_{12}$: (同上)
 $D_1 \sim D_{12}$: (同上)
 $C_1 \sim C_6$: 10 μF
 $L_1 \sim L_6$: 14 μH
 $L_{M1} \sim L_{M12}$: 5 μH
 $Z_1 \sim Z_6$: 1 mH

$Z_7 \sim Z_{12}$: 0.07 Ω 、1.75 mH (ただし一次側換算)
 $Z_{L1} \sim Z_{L6}$: 1.2 Ω 、12.5 mH (0.12 Ω /km、1.25mH/km の10km分)
 $Z_{13} \sim Z_{15}$: 7.9 Ω 、200 mH
 $E_1 \sim E_3$: 60 kV (60 Hz)
 R_0, R_1, R_2 : 300 Ω
 R_g : 平常時 $10^{10} \Omega^{-1}$ 、事故時 $10^{-6} \Omega^{-1}$
 R_{s1}, R_{s2} : (同上)
 Z_{fa}, Z_{fb}, Z_{fc} : 100 Ω 、~~580~~ H
 C_{fa}, C_{fb}, C_{fc} : ~~10~~ μF ⁵⁸
 1000 pF
 (0.29 H)
 (0.2 μF)

変圧比 15

前節で述べたように、MHD 発電機との接続後、上に挙げた素子のうちの、V と Z_v にそれぞれ MHD 発電機の起電力、内部抵抗がはいる。

§ 1 - 4 事故解析の方法

本研究で取り上げた事故とその模擬方法を以下に述べる。

1) インバータの点弧失敗事故

ひとつのメインサイリスタを点弧しない状態にする。

2) インバータの転流失敗事故

ひとつの転流用サイリスタを点弧しない状態にする。

3) 交流系統の 1 線地絡事故

地絡事故模擬用抵抗 (図1-3.1の R_g 、平常は非常に大きい値である。) を小さい値に変化させる。

4) 交流系統の2線短絡事故

短絡事故模擬用抵抗(図1-3.1の R_{s2} 、平常は非常に大きい値である。)を小さい値に変化させる。

5) 交流系統の1線断線事故

一つの送電線インピーダンスの抵抗分の値を大きな値に変化させる。

第2章 解析結果と考察

§2-1 インバータの点弧時期と導通時期

自励式インバータの特長として、メインサイリスタの点弧角 α を広範囲に設定できること、導通期間 θ を自由に変えられることがあげられる。以下、この章ではシステムについての種々の解析について述べるが、その際、点弧角 α の代りに次式で与えられる点弧時期 β を用いることにする。

$$\beta = \alpha - 150^\circ \quad (2-1.1)$$

点弧時期 β を用いると、 $\beta = 0^\circ$ の場合、無限大母線各相の零電圧時に上側インバータのメインサイリスタが点弧されることになり、インバータの出力電流と無限大母線各相電圧との関係が明確になる。また、メインサイリスタの導通期間については、時間でなく角度で表すことにする。

なお、図2-2.1以下の図において、同一グラフ中に複数の曲線がある場合は、以下のようであるとする。

- 1) 分圧コンデンサの電圧は実線がCa、破線がCbの電圧
- 2) 送電線電流は、実線がa相、破線がb相、一点鎖線がc相の電流

また、MHD発電機内の諸量を表すグラフ(図2-2.6など)において、 X はダクト入口からの距離、TIMEは時刻をあらわし、各目盛は正規化されているので注意されたい。

§ 2-2 システムの定常特性

本節では、MHD発電機-自励式インバータ-交流系統連係システム(以下、単にシステムと呼ぶ)を、点弧時期 $\beta = 0^\circ$ 、導通期間 $\theta = 120^\circ$ で運転した場合の定常特性について述べる。

図2-2.1は、MHD発電機(先にも述べたように定電圧源である)端子電圧及び負荷電流のグラフである。システムは起動後約15msで定常に達する。定常時の端子電圧は約12.5KV、負荷電流は約820Aであり、負荷率は0.50である。

図2-2.2は、インバータの単位回路における1対のメインサイリスタ M_1 、 M_2 の、枝電圧、枝電流のグラフである。これらのグラフを見ると、特に電圧波形において鋭い歪が見られる。これは、複数のサイリスタが次々に点弧するというインバータの動作に起因する。以下に少し説明する。

図2-2.2を見ると、約22msで M_1 にかかる電圧が急に大きくなり、それと同時に M_1 を流れる電流が切れ、 M_1 が消弧したことがわかる。それまで M_1 を流れていた電流は、一時 D_2 を通して変圧器に供給される。そのため、 M_2 にかかる電圧が、 D_2 の電圧降下とほぼ等しくなり、一時的にほとんど零となることが M_2 の電圧波形を見ることによりわかる(約22ms~約23msの落込み)。その後、慣性による電流がおさまると、 M_2 の電圧は再び大きくなる(約23ms)。その時、 M_1 、 M_2 は共に消弧しているので、 M_1 にかかる電圧と M_2 にかかる電圧の和は、分圧コンデンサ C_a にかかる電圧、すなわち端子電圧のほぼ半分にだいたい等しいと考えてよい。そのため、 M_2 の電圧が再び大きくなるのに対応して M_1 の電圧は落ち込む(約23ms~約25ms)。その後 M_2 が点弧される(約25ms)ので、 M_1 にかかる電圧はまた大きくなる。インバータの各メインサイリスタは、この動作を繰り返す。

図2-2.3は、上側変圧器($T_1 \sim T_3$ 、 $T_7 \sim T_9$ を持つ変圧器を上側変圧器と呼ぶ)の一次側(インバータ側)電流の波形であり、かなりの高調波が含まれていることがわかる。

図2-2.4は、送電線電流の波形であり、高調波はかなり除去されている。これは、変圧器部分にY-Y、Y- Δ 結線を用い位相を互いに 30° ずらせたことにより、 $\sqrt{6m \pm 1}$ ($m=1, 3, 5, \dots$)_{5, 7}倍高調波が消えたことと、高調波除去フィルターの効果による。

図2-2.5はMHD発電機負荷電流の周波数成分を直流分に対する百分率で表したものと、変圧器一時側電流及び送電線電流の高調波を基本波に対する百分率で表したものを示す。MHD発電機負荷電流には、 $12m$ ($m=1,2,3, \dots$) 倍高調波が含まれている。これは、12個のメインサイリスタの点弧・消弧によるものである。また、変圧器一時側電流には、 $6m \pm 1$ ($m=1,2,3, \dots$) 倍高調波成分が含まれ、うち最大の5倍高調波で、基本波の約22%にも達する。一方、送電線電流には、 $12m \pm 1$ ($m=1,2,3, \dots$) 倍高調波成分が含まれているが、その値は最大の11倍高調波でも約4.9%と小さく、送電線電流は、正弦波に近い波形となっていることがわかる。

図2-2.6、図2-2.7、図2-2.8、図2-2.9、図2-2.10、図2-2.11は、MHD発電機内の諸量のうち順に、流体の圧力、温度、流速、マッハ数、 E_x 、 J_y のグラフである。

§ 2-3 点弧時期によるシステム制御の解析

本節では、点弧時期 β の値を変化させることによる、システムの特
性解析について述べる。

本解析においては、導通期間 θ は 120° に固定し、点弧時期 β だけを変化させた。

解析の結果、システムが正常な定常運転を持続するのは、だいたい、 $-45^\circ \leq \beta \leq +15^\circ$ の時であった。これを点弧角 α に換算すると、 $+105^\circ \leq \alpha \leq +165^\circ$ の時にあたる。図2-3.1、図2-3.2、図2-3.3はそれぞれ、点弧時期をパラメータとしたMHD発電機端子電圧、MHD発電機負荷電流、送電線電流(a相)である(ただし、 $\beta = 0^\circ$ は、本研究において基準的な状態としたため、特に NORMAL と記した)。また、表2-3.4は各点弧時期における、MHD発電機出力電力、MHD発電機負荷率、インバータ出力電力、インバータ効率、受電端電力(無限大母線を受電端とみなす)、送電効率、受電端における力率、送電線電流の無限大母線に対する位相差(遅れを正にとる)を示したものである。電力はすべて実効電力を用い、効率については次式を用いた。

$$\text{(インバータ効率)} = \frac{\text{(インバータ出力電力)}}{\text{(MHD発電機出力電力)}} \times 100 \quad [\%]$$

$$\text{(送電効率)} = \frac{\text{(受電端電力)}}{\text{(MHD発電機出力電力)}} \times 100 \quad [\%]$$

なお、 $\beta = 20^\circ$ の場合が本システムの定常運転可能限界にあたり、本解析において計算を行った時間内 (50 ms) では、インバータは正常な動作をしているものの、MHD発電機は定常に達していない。よって、 $\beta = 20^\circ$ の場合については表2-3.4からは除いてある。

これらの図、表からわかることを以下に要約する。

- 1) $-45^\circ \leq \beta \leq +15^\circ$ では、点弧時期を遅くする(つまり β を大きくする) につれて負荷電流は小さくなり負荷率は上昇する。
- 2) MHD発電機出力電力、インバータ出力電力、受電端電力は、 $\beta = +5^\circ$ で極大となる。
- 3) インバータ効率、送電効率は $\beta = +15^\circ$ で極大となる。
- 4) 力率は $\beta = +15^\circ$ で 1 となり、 $\beta < +15^\circ$ の範囲では『進み』となる。

以上の結果より次のことを考察した。

- β を小さくすることにより、無効電力が増大し、それが効率の低下の原因となっている。
- β を変えることにより、『進み』の無効電力の供給、電流の位相の制御が可能である。
- 自励式インバータの動作可能範囲は理論上、 $+90^\circ \leq \alpha \leq +180^\circ$ であり、これは $-60^\circ \leq \beta \leq +30^\circ$ にあたる。変圧器や線路のインピーダンスの改善により $\beta \geq +15^\circ$ とすることが可能となるであろう。そうすると、『遅れ』力率の電力を供給することも可能になると考えられる。

図2-3.5は、点弧時期を変えることによって得られた、負荷電流-端子電圧特性である。

§ 2-4 導通期間によるシステム制御の解析

本節では、導通期間 θ の値を変化させることによるシステムの特
性解析について述べる。

本解析においては、点弧時期 β は 0° に固定し、導通期間 θ だけ
を変化させた。

解析の結果、システムが正常な定常運転を持続するのは、 $115^\circ \leq \theta \leq 125^\circ$ の時であった。図2-4.1、図2-4.2、図2-4.3、及び表2-4.4はそれぞれ、前節の図2-3.1、図2-3.2、図2-3.3、表2-3.4に対応する(ただし、図2-4.1、図2-4.2、図2-4.3において $\theta = 120^\circ$ は、本研究において基準的な状態としたため、特に NORMAL と記した)。なお、 $\theta = 110^\circ$ の場合、前節の $\beta = 20^\circ$ の場合同様、MHD 発電機が定常に達していないので表2-4.4からは除いてある。

これらの図、表から、導通期間 θ を変化させることによっても力率の制御が可能であることがわかるが、本研究においては θ による制御は、 β による制御ほど広範囲において可能というわけにはいかなかった。

§ 2-5 事故時の特性

本節では事故解析の結果について述べる。

以下の各種事故解析において、点弧時期 β 、導通期間 θ については、 $\beta = 0^\circ$ 、 $\theta = 120^\circ$ に固定する。そしてシステム起動後、十分定常状態に達していると思われる時刻(本解析では起動後 40msとしている)で事故が発生したものとし、その後も運転を継続した場合のシミュレーションを行った。

(1) インバータの点弧失敗事故時の特性

本項では、メインサイリスタのひとつ（図1-3.1の M_1 ）が何らかの原因で点弧しなくなった事故を想定し、そのメインサイリスタを点弧させないことにより模擬した解析について述べる。

図2-5(1).1、図2-5(1).2は、それぞれMHD発電機端子電圧、負荷電流である。また、図2-5(1).3は分圧コンデンサの電圧波形である。さらに、図2-5(1).4、図2-5(1).5は、それぞれ変圧器一次側の Ca 側、 Cb 側電流波形である。これらのグラフより以下のことがわかる。すなわち、事故発生後 20msほどの間、負荷電流は負にまで落ち込み、MHD発電機端子電圧は上がっている。そのショックの後、MHD発電機端子電圧は事故発生前の状態に近い状態に戻っている。しかし、その波形を見ると、事故発生前の12倍高調波に代って6倍高調波が現われており、上側インバータが開放していることがわかる。また実際、図2-5(1).4を見ると、上側変圧器には電流が流れなくなっている。その結果、端子電圧のほとんどが Ca にかかっていることが図2-5(1).3よりわかる。また図2-5(1).4、図2-5(1).5から、事故発生後、上側変圧器には電流が流れなくなるが、下側変圧器には20msほどのショックの後、再び電流が流れはじめることがわかる。しかし、その電流値は事故発生前より小さくなっている。図2-5(1).6は送電線電流であるが、事故発生後は下側インバータによる電流のみが流れるため、電流値がかなり小さくなることがわかる。図2-5(1).2より、事故後MHD発電機は直流電流をほとんど送り出していない、正常な運転を停止したことがわかる。

さて、図2-5(1).7は流体の圧力、図2-5(1).8は温度、図2-5(1).9は流速、図2-5(1).10はマッハ数、図2-5(1).11は E_x 、図2-5(1).12は J_y のグラフである。事故発生後、圧力、温度は上昇、流速、マッハ数は低下しており、特にマッハ数が1より小さくなってしまふ、すなわち流速が音速を割ってしまうことが注目される。また、 E_x 、 J_y は、事故発生直後、大きく上昇するが、すぐ(約15ms)少し低下し、その後は小さい振動を続ける。

(2) インバータの転流失敗事故時の特性

本項では、転流用サイリスタのひとつ(図1-3.1の S_1)が何らかの原因で働かなくなった事故を想定し、その転流用サイリスタに転流パルスを加えないことにより模擬した解析について述べる。

図2-5(2).1、図2-5(2).2、図2-5(2).3はそれぞれ、MHD発電機端子電圧、負荷電流、分圧コンデンサ電圧波形である。また図2-5(2).4、図2-5(2).5はそれぞれ、変圧器一次側の上側、下側電流である。さらに図2-5(2).6はメインサイリスタ(M_1)の電圧を表す。これらのグラフより以下のことがわかる。すなわち、事故発生後は M_1 が消弧しなくなるため、MHD発電機は短絡に近い状態となりCaにかかる電圧はたいへん小さくなっている。また、事故発生後、下側変圧器電流に較べて上側変圧器電流は大きく変動する。すなわち、上側変圧器には位相の反転した過大な電流が流れる。しかも、その電流には直流分が含まれるため注意を要する。図2-5(2).7は、送電線電流であるが事故発生後、電流値が大きくなることがわかる。

ところで、約90ms以後15msほどの間、MHD発電機は一時開放に向かうようすを示しており、これは発電機として定電圧源を用いた場合には見られなかった⁶⁾ことである。その後MHD発電機は再び短絡に近い状態となる。

さて、図2-5(2).8～図2-5(2).13はそれぞれ前項の図2-5(1).7～図2-5(1).12に対応するが、事故発生直後、一時、圧力、温度はわずかに低下、流速、マッハ数は上昇するが、その後、上に述べたようにMHD発電機が一時開放に向かうようすを示した(90ms)のに対応して、諸量は大きく変化している。すなわち、圧力、温度は大きく上昇、流速、マッハ数は極端な落ち込みを示し流速は音速を割っている。しかしその後、そのような変動の反動であるかのように圧力、温度は下降し流速、マッハ数は増大している。この後、流体諸量が振動的に変化するのか、あるいは落ち着くのか興味深いところである。Ex、Jyも、わずかに低下した後、大きく上昇し、その後再び低下し、上記流体諸量の変化に対応した変化を示している。

(3) 交流系統の1線地絡事故時の特性

本項では、送電線の1線が地絡した事故を想定し、地絡事故模擬用抵抗(図1-3.1の R_g)を小さくすることにより模擬した解析について述べる。

図2-5(3).1、図2-5(3).2、図2-5(3).3はそれぞれMHD発電機端子電圧、負荷電流、分圧コンデンサ電圧波形である。また、図2-5(3).4、図2-5(3).5、図2-5(3).6、図2-5(3).7はそれぞれ変圧器一次側の上側、下側電流、及び送電線電流(事故地点よりインバータ側と無限大母線側、共にc相)である。これらのグラフより以下のことがわかる。すなわち、事故発生後、MHD発電機負荷電流には2倍高調波が見られるものの、MHD発電機は定常運転を継続している。また、送電線電流は事故地点よりインバータ側では値がやや大きくなる程度である。しかし事故地点より無限大母線側においては、事故発生後は交流電源から電流が逆流している。

さて、図2-5(3).8~図2-5(3).13はそれぞれ前項の図2-5(2).8~図2-5(2).13に対応するが、事故発生後、圧力、温度は低下、流速、マッハ数は上昇しており、前項の転流失敗事故時と傾向は似ている。しかし、その変化はずっと小さい。また、 E_x 、 J_y は事故発生後、変動を続けるものの、定常運転を継続している。

これらのことより、交流系統の1線地絡事故は、インバータの転流失敗事故に似た事故であるが、その影響はずっと小さい事故であると言える。

(4) 交流系統の2線短絡事故時の特性

本項では、送電線の2線が短絡した事故を想定し、短絡事故用抵抗のうちの1つ(図1-3.1の R_{s2})を小さくすることにより模擬した解析について述べる。

図2-5(4).1、図2-5(4).2、図2-5(4).3はそれぞれ、MHD発電機端子電圧、負荷電流、分圧コンデンサ電圧波形である。また、図2-5(4).4、図2-5(4).5はそれぞれ、変圧器一次側の上側、下側電流である。これらのグラフより以下のことがわかる。すなわち、事故発生後、負荷電流は大きく変動し、MHD発電機は正常な運転を停止する。図2-5(4).6は M_5 の電流波形である

が、事故発生後このメインサイリスタは点弧失敗に陥っていることがわかる。図2-5(4).7、図2-5(4).8は、送電線電流(事故地点よりインバータ側と無限大母線側、共にc相)であるが、これより、事故地点よりインバータ側では事故発生後約35ms間のショックを経て電流は事故発生前に近い状態に戻るが、無限大母線側では事故発生後は交流電源からの電流の逆流が起こることがわかる。

図2-5(4).9～図2-5(4).14はそれぞれ前項の図2-5(3).8～図2-5(3).13に対応するが、事故発生後、圧力、温度は上昇、流速、マッハ数は低下しており、計算を行った時間内(100ms)では、インバータが点弧失敗を起こしているため、インバータの点弧失敗事故時に似た傾向を示している。また、Ex、Jyを見ても、インバータの点弧失敗事故時のようすに似ている。しかし、発電機として定電圧源を用いた解析では、2線短絡事故の発生後数10msでシステムは短絡に向かうことが報告されており⁷⁾この後システムが、どういう特性を示すか興味深い。

(5) 交流システムの1線断線事故時の特性

本項では、送電線の1線が断線した事故を想定し、1つの送電線インピーダンスの抵抗分を大きくすることにより模擬した解析について述べる。

図2-5(5).1、図2-5(5).2、図2-5(5).3はそれぞれ、MHD発電機端子電圧、負荷電流、分圧コンデンサ電圧波形である。これらを見ると、以下の事がわかる。すなわち、事故発生後10msほどの間、負荷電流は負にまで落ち込み、MHD発電機端子電圧は上がる。その後、負荷電流は零となり、MHD発電機端子電圧はほぼ事故発生前の値に戻る。さらに図2-5(5).4、図2-5(5).5はそれぞれ変圧器一次側の上側、下側電流波形であるが、事故発生後どちらにもほとんど電流が流れなくなることがわかる。図2-5(5).6は送電線電流であるが、事故発生後はほとんど電流が流れていない。

これらのことより交流システムの1線断線事故時の特性は、本節(1)項で述べたインバータの点弧失敗事故時の特性によく似ていることがわかる。ただ、インバータの点弧失敗事故時には事故発生後も下側インバータが運転を持続したのに対し、交流システムの1線断線事故時には、事故発生後システムは

停止してしまう。

さて図2-5(5).7～図2-5(5).12はそれぞれ前項の図2-5(4).9～図2-5(5).14に対応するが、事故発生後、圧力、温度は上昇、流速、マッハ数は低下し、 E_x 、 J_y は大きく上昇する。これらのようすも本節(1)項で述べたインバータの点弧失敗事故時のようすにたいへんよく似ているが、本項の交流系統の1線断線事故の場合、下側インバータも運転を停止するのでインバータの点弧失敗事故時 E_x や J_y で見られた事故後の小さな振動はなく、非常に静かな状態に落ち着くことがわかる。

結論

1. MHD 発電による電力を交流系統に供給する際の直流交流変換装置として自励式インバータを用いると、その点弧時期、導通期間を調整することによって供給電力の力率を広範囲に制御できる。本研究においては、点弧時期 β 、及び導通期間 θ の運転可能範囲は次の通りであった。
$$-45^{\circ} \leq \beta \leq +15^{\circ} (\theta = 120^{\circ}), 115^{\circ} \leq \theta \leq 125^{\circ} (\beta = 0^{\circ})$$
2. インバータの点弧失敗事故及び交流系統の 1 線断線事故は、MHD 発電機が開放に向かう事故であり、その際 MHD 発電機内の流体の圧力、温度は上がり、流速、マッハ数は下がる。
3. インバータの転流失敗事故は、MHD 発電機が短絡に向かう事故であり、放置すると変圧器 1 次側電流に直流分が加わり、送電線電流も大きくなるので対策が必要である。
4. 交流系統の 2 線短絡事故は、インバータの点弧失敗を引き起こす。そのため MHD 発電機は一時開放に向かうが、その後短絡に転ずる可能性もあり、さらに研究が必要である。
5. 交流系統の 1 線地絡事故は、MHD 発電機、インバータにあまり大きな影響を与えない。よって MHD 発電機は運転を持続できる。

謝辞

本論文を作成するにあたり、終始懇切丁寧な御指導を頂きました卯本重郎教授に厚く御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたって多くの有益な御助言を賜りました石川本雄助教授に深く感謝いたします。

さらに、神戸工業高等専門学校の前ノ瀬信彦助教授には、貴重な時間を割いてまで、いつも親切に御指導していただき心より感謝いたしております。

また、卯本研究室の安藤詔生助手、同 乾義尚助手には、しばしば有益な御助言を頂き、深く感謝いたします。

最後に、本研究において多大なる御援助を下さいました、田村市朗氏をはじめとする卯本研究室の皆様へ深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 西村正太郎ほか3名、現代電気機器学(オーム社、1982)
- 3) 河野広道、インバータを接続したMHD発電機と電力系統との相互作用に関する研究、修士論文(1985)
- 4) P.J.Roache(高橋亮一、他訳)、コンピュータによる流体力学・下(1976)、70.
- 5) Technical Report of the Investigation Committee of MHD Generator Plant in Japan, (1973)
- 6)7) 早ノ瀬信彦ほか3名、第7回 エネルギー利用と直接発電シンポジウム(北海道大学工学部附属直接発電実験施設)、(1984)、53.
- 8) 小沢孝夫、電気回路II(昭晃堂、1980)
- 9) Motoo Ishikawa, Unsteady Phenomena in High-Interaction MHD Generators, Technical Reports of Institute of Atomic Energy, Kyoto Univ.No.192(1982)
- 10) R.J.Rosa, Magnetohydrodynamic Energy Conversion
- 11) 玉置琢磨、荻原宏康、MHD発電(総合科学出版、1967)

付録

ここでは、本研究で用いた回路網状態方程式の数値解析法を一般的な形で述べる。

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) 変圧器については、1次側と2次側で対応する巻線は、どちらか片方だけを基準木に選ぶ。

その結果、補木及び基準木は、各々次のような構成となる。

補木	[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 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字に使うことにする。

この様にして選んだ基準木と補木の枝に、枝方向を決め、それをもと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 $(n_x + n_l)$ 行、 $(n_v + n_y + n_c + n_t)$ 列の行列である。そこで、 F を8個の部分に分け、次のように表す。

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

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、 O 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、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} U & F_{xv} & F_{xy} & F_{xc} & F_{xt} \\ & F_{lv} & F_{ly} & F_{lc} & F_{lt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_l \\ v_v \\ v_y \\ v_c \\ v_t \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{付-1})$$

式(付-1)を、 v_x を含むものと v_l を含むものに分けると、以下の式を得る。

$$v_x + F_{xv} v_v + F_{xy} v_y + F_{xc} v_c + F_{xt} v_t = 0 \quad (\text{付-2a}) \quad \circ$$

$$v_l + F_{lv} v_v + F_{ly} v_y + F_{lc} v_c + F_{lt} v_t = 0 \quad (\text{付-2b}) \quad \circ$$

式(付-2b)を変形すると、次式を得る。

$$F_{lt} v_l + v_l = -(F_{lv} v_v + F_{ly} v_y + F_{lc} v_c) \quad (\text{付-3})$$

変圧比より導かれる行列 K を考えると、

$$v_l = K v_t \quad (\text{付-4}) \quad \circ$$

なる関係が成立する。式(付-4)を式(付-3)に代入すると、次式を得る。

$$v_t = -F_l (F_{lv} v_v + F_{ly} v_y + F_{lc} v_c) \quad (\text{付-5})$$

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

式(付-5)を式(付-2a)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。

$$v_x + B_{xy} v_y + B_{xc} v_c = B_{xv} v_v \quad (\text{付-6})$$

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

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

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

式(付-6)を書き換えると、

$$\begin{bmatrix} U & B_{xy} & B_{xc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_c \end{bmatrix} = B_{xv} v_v \quad (\text{付-7})$$

なる、KVLを表す式を得る。

独立変数
独立変数は v_v だけ。

独立変数
独立変数は v_v だけ。

一方、カットセット行列主要部は $-F^1$ 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、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} -F_{vx} & -F_{v1} \\ -F_{yx} & -F_{y1} \\ -F_{cx} & -F_{c1} \\ -F_{tx} & -F_{t1} \\ -I_{gx} & F_{g1} \end{bmatrix} \mathbf{U} \begin{bmatrix} i_x \\ i_1 \\ i_v \\ i_y \\ i_c \\ i_t \\ I_g \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (\text{付-8})$$

ただし、 $F_{vx} = F_{vx}^1$ などの表記法を用いた。

式(付-8)を、 i_v を含むもの、 i_c を含むもの、及び i_t を含むものに分けると、以下の4式を得る。

$$-F_{vx} i_x - F_{v1} i_1 + i_v = 0 \quad (\text{付-9a})$$

$$-F_{yx} i_x - F_{y1} i_1 + i_y = 0 \quad (\text{付-9b})$$

$$-F_{cx} i_x - F_{c1} i_1 + i_c = 0 \quad (\text{付-9c})$$

$$-F_{tx} i_x - F_{t1} i_1 + i_t = 0 \quad (\text{付-9d})$$

前述の行列Kを用いると、

$$i_t = -K i_1 \quad (\text{付-10})$$

なる関係が成立する。式(付-10)を式(付-9d)に代入すると、次式を得る。

$$i_1 = -F_2 F_{tx} i_x \quad (\text{付-11})$$

$$(\text{ただし、} F_2 = (F_{t1} + K)^{-1})$$

式(付-11)を、式(付-9b)、(付-9c)に代入すると、計算に必要なだけの、KCLを表す方程式(付-12)及び(付-13)を得る。

$$Q_{yx} i_x + i_y = 0 \quad (\text{付-12})$$

$$Q_{cx} i_x + i_c = 0 \quad (\text{付-13})$$

$$\text{ただし、} Q_{yx} = -F_{yx} + F_{y1} F_2 F_{tx}$$

$$Q_{cx} = -F_{cx} + F_{c1} F_2 F_{tx}$$

式(付-12)と式(付-13)をまとめると、次式のように表せる。

$$\begin{bmatrix} Q_{yx} \\ Q_{cx} \end{bmatrix} \mathbf{U} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_c \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (\text{付-14})$$

次に、各枝の素子定数から以下の3式を得る。

$$v_x + (L_x d/dt + R_x) i_x = 0 \quad (\text{付-15})$$

$$v_y + (L_y d/dt + R_y) i_y = 0 \quad (\text{付-16})$$

$$i_c + (C_c d/dt + G_c) v_c = 0 \quad (\text{付-17})$$

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。式(付-15)、(付-16)、(付-17)より次式を得る。

$$\begin{bmatrix} d \\ - \\ dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_y & 0 \\ 0 & 0 & -C_c & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U & 0 & -R_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_y & 0 \\ 0 & 0 & -G_c & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_c \\ i_x \\ i_y \\ i_c \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{付-18})$$

式(付-7)、(付-14)及び(付-18)を1つにまとめると、枝集合x、y、及び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、

$$\begin{bmatrix} d \\ - \\ dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_y & 0 \\ 0 & 0 & -G_c & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} UB_{xy} B_{xc} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{yx} & U & 0 \\ 0 & 0 & Q_{cx} & 0 & 0 \\ U & 0 & -R_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_y & 0 \\ 0 & 0 & -G_c & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_c \\ i_x \\ i_y \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xy} v_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{付-19})$$

なる、 $\{2 \times (n_x + n_y + n_c)\}$ 元1階常微分方程式として表せる。

ここで、式(付-19)を、次のように書換える。

$$A dx/dt + Bx = d \quad (\text{付-20})$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{ただし、} \\ A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_y & 0 \\ 0 & 0 & -C_c & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \\ B = \begin{bmatrix} U & B_{xy} & B_{xc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{yx} & U \\ 0 & 0 & Q_{cx} & U \\ U & 0 & -R_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_y & 0 \\ 0 & 0 & -G_c & 0 & 0 & U \end{bmatrix} \\ \\ x = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_c \\ i_x \\ i_y \\ i_c \end{bmatrix} \\ \\ d = \begin{bmatrix} B_{xy} v_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \right]$$

式(付-20)を差分方程式に書き表すと、

$$A \{x_{(n)} - x_{(n-1)}\} / \Delta t + B x_{(n)} = d_{(n)} \quad (\text{付-21})$$

となる。ただし、 $x_{(n)}$ 、 $d_{(n)}$ は、 x 、 d の、 $t = n \Delta t$ における値である。式(付-21)は、次式のように表せる。

$$x_{(n)} = (A + \Delta t B)^{-1} (A x_{(n-1)} + \Delta t d_{(n)}) \quad (\text{付-22})$$

ここで、ベクトル $d_{(n)}$ は、ベクトル v_v のみから独立に求められる。よって、上式(付-22)を用いて、 $x_{(n)}$ を求めることができる。

点弧時期	MHD発電機 出力電力 (MW)	負荷率	インバータ 出力電力 (MW)	インバータ 効率 (%)	受電端電力 (MW)	送電効率 (%)	力率	位相差
-45°	3.76	0.10	3.05	81.0	2.18	57.9	0.15(進み)	-82°
-30°	8.10	0.28	7.08	87.4	6.60	81.4	0.57(進み)	-55°
-20°	9.70	0.38	9.26	95.5	8.90	91.8	0.77(進み)	-39°
-15°	10.00	0.41	9.57	95.7	9.25	92.5	0.82(進み)	-35°
-10°	10.25	0.44	9.86	96.3	9.54	93.1	0.87(進み)	-30°
-5°	10.43	0.47	10.05	96.4	9.75	93.5	0.91(進み)	-24°
0°	10.52	0.50	10.16	96.6	9.84	93.5	0.95(進み)	-19°
+5°	10.52	0.54	10.20	96.9	9.86	93.7	0.97(進み)	-14°
+10°	10.29	0.58	9.99	97.0	9.68	94.0	0.99(進み)	-8°
+15°	9.53	0.64	9.43	99.0	9.06	95.1	1.00	-4°

表2-3.4 点弧時期と電力、負荷率、効率、力率、位相差

導通期間	MHD発電機 出力電力 (MW)	負荷率	インバータ 出力電力 (MW)	インバータ 効率 (%)	受電端電力 (MW)	送電効率 (%)	力率	位相差
115°	10.42	0.56	10.07	96.7	9.71	93.2	0.93(進み)	-22°
120°	10.52	0.50	10.16	96.6	9.84	93.5	0.95(進み)	-19°
125°	10.50	0.49	10.20	97.1	9.85	93.7	0.96(進み)	-16°

表2-4.4 導通期間と電力、負荷率、効率、力率、位相差

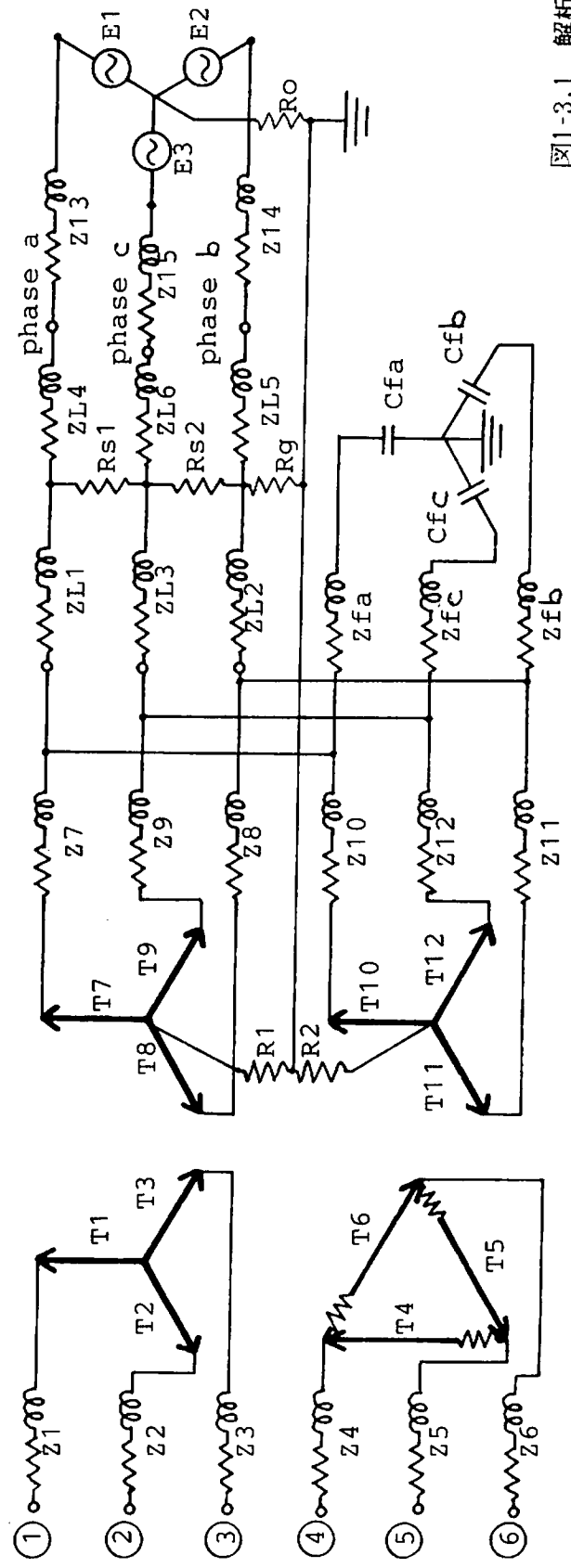
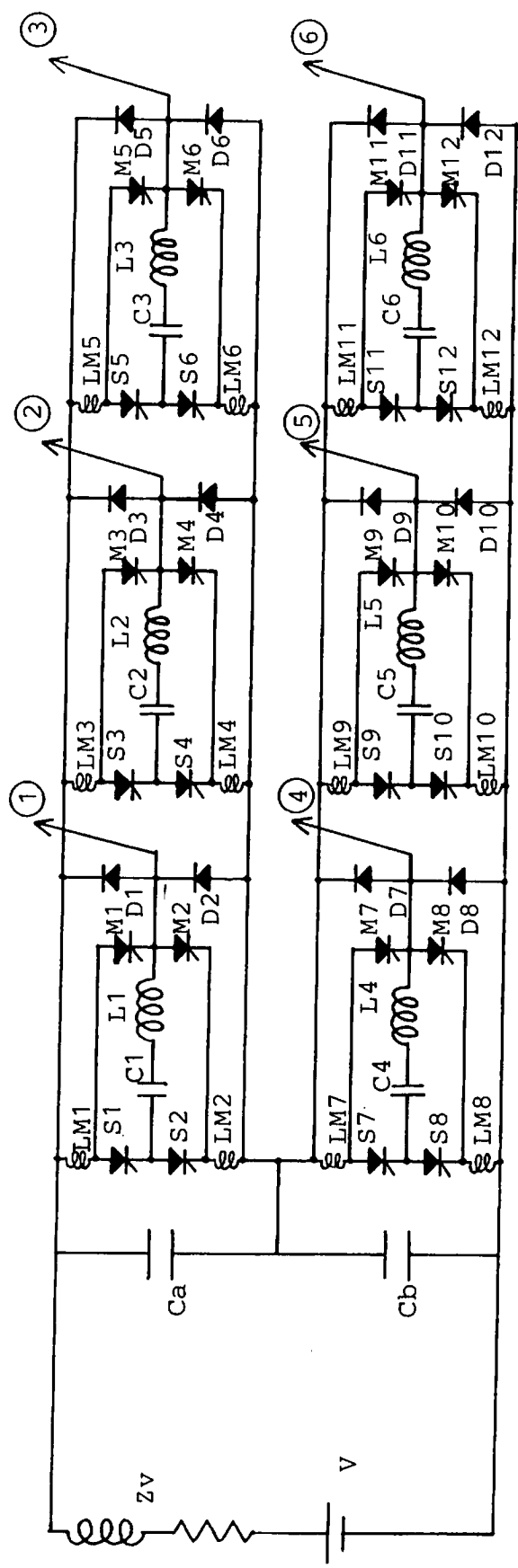


図1-3.1 解析に用いる回路

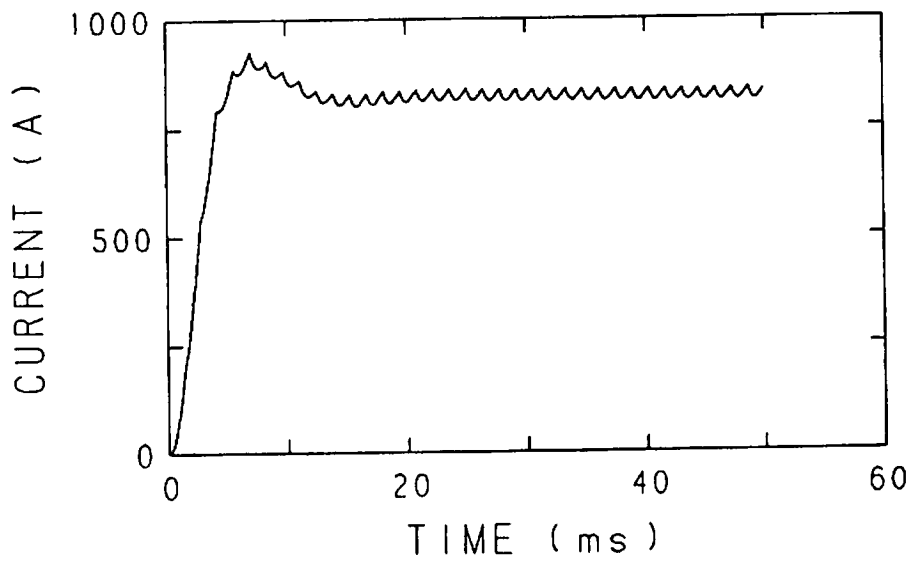
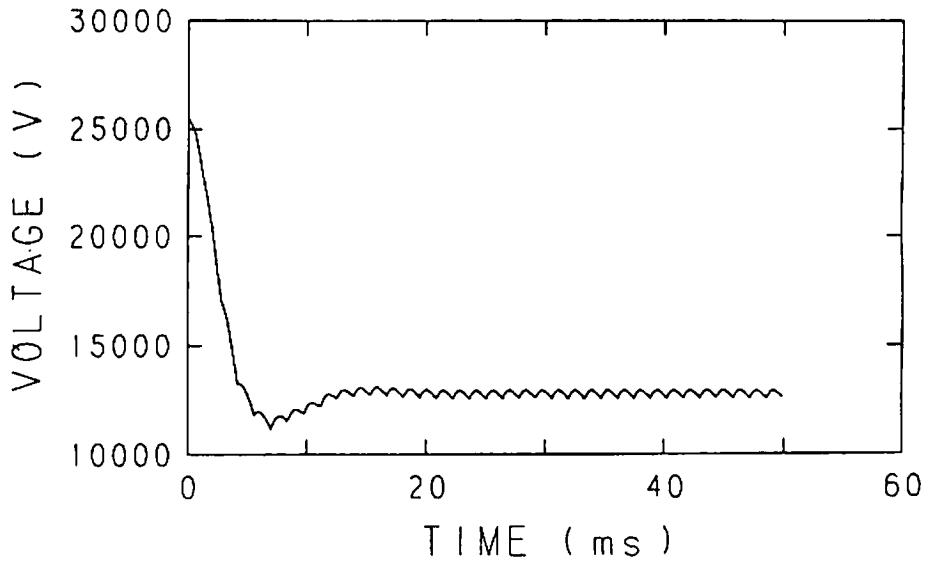


図2-2.1 MHD発電機の端子電圧と負荷電流

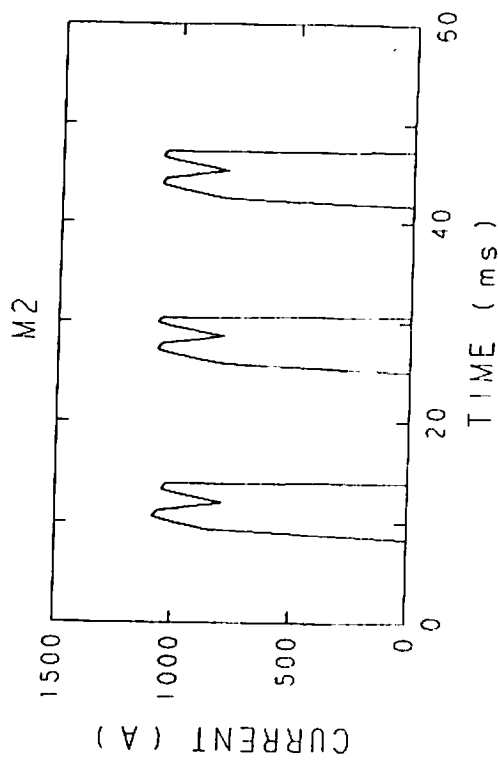
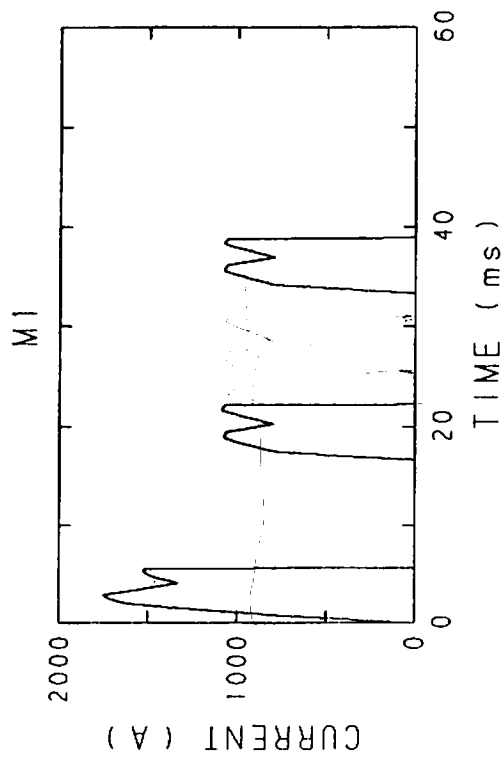
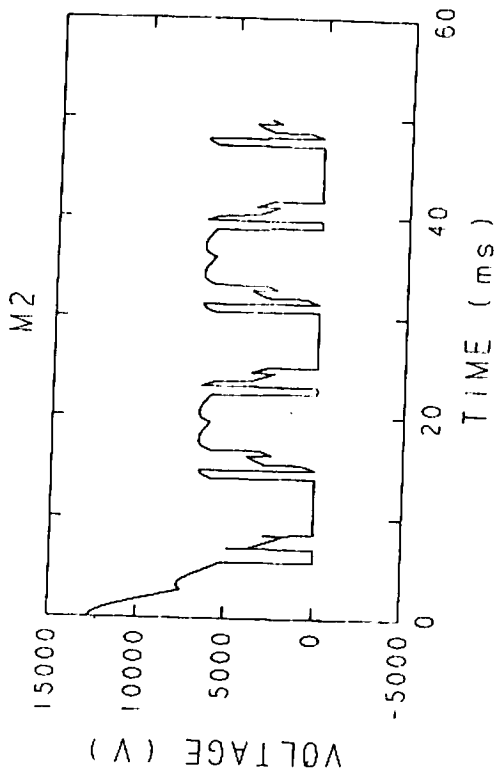
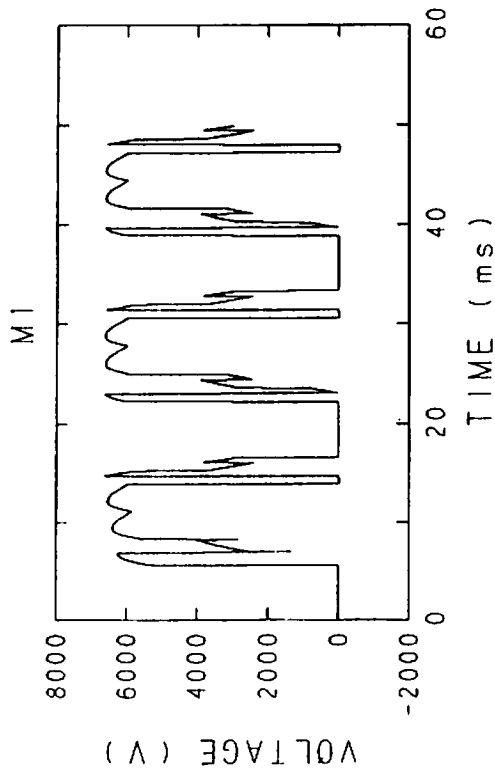


図2-2.2 メインサイリスタの電圧と電流

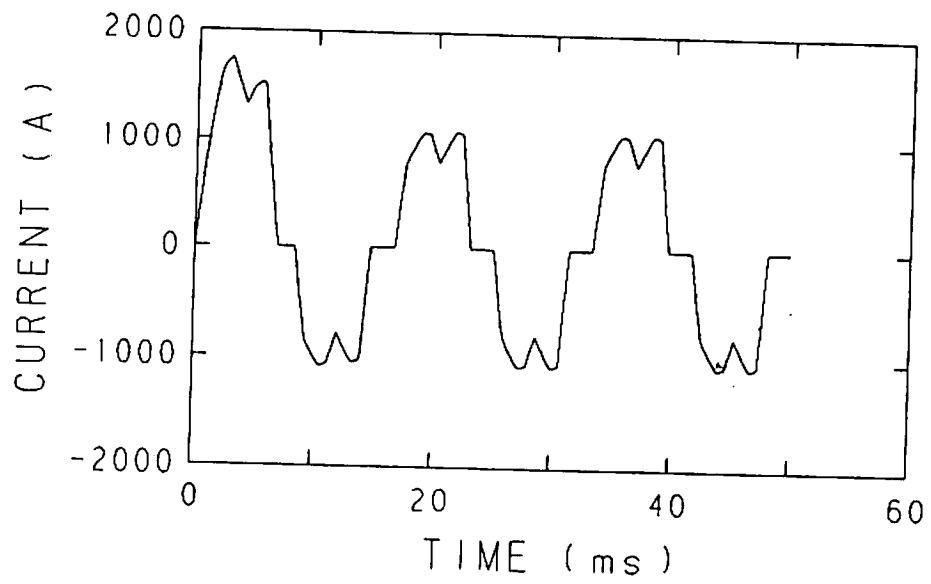


図2-2.3 上側変圧器一次側電流

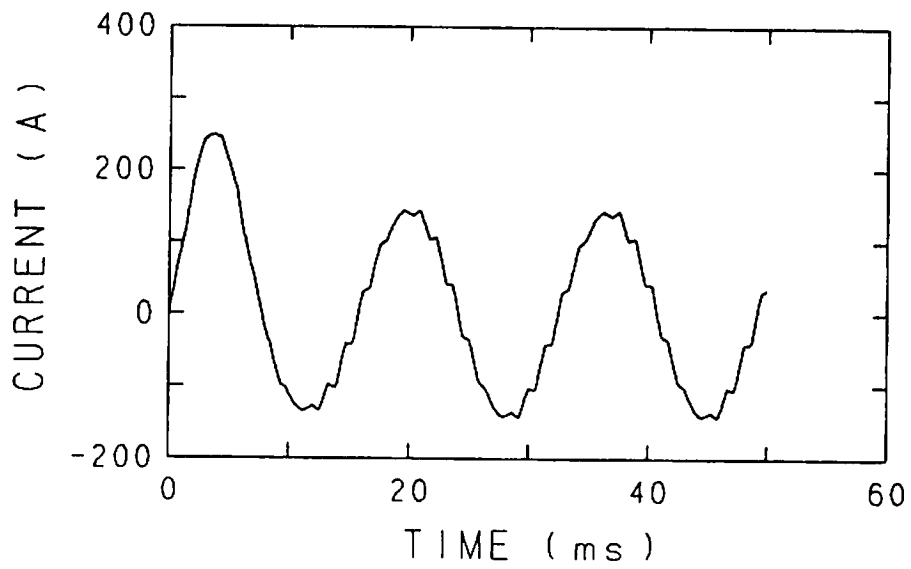
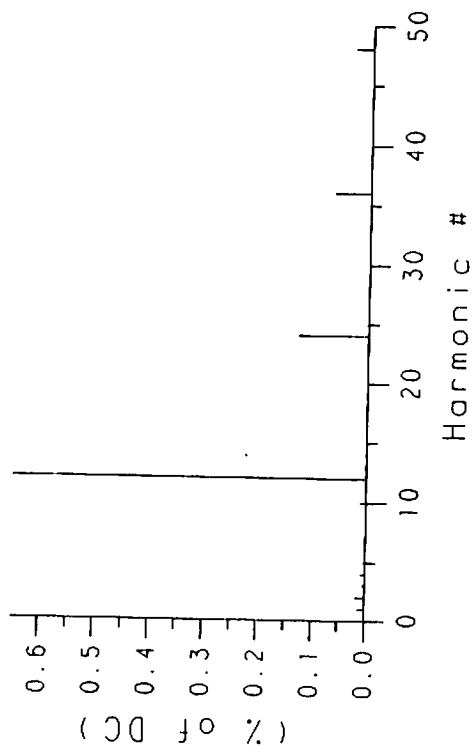
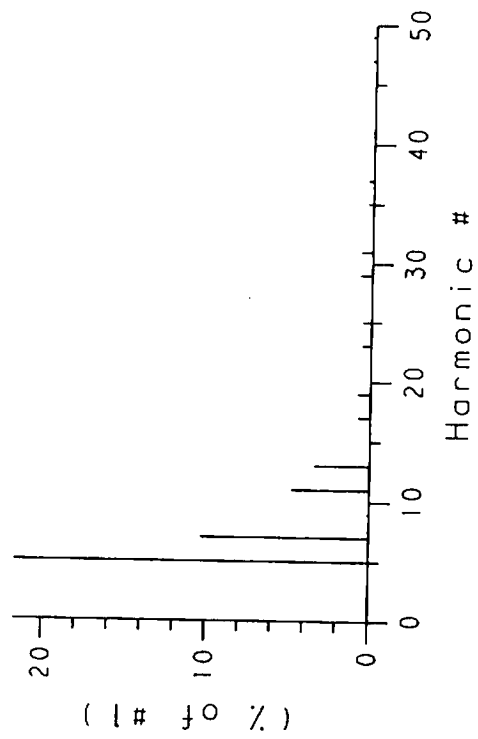


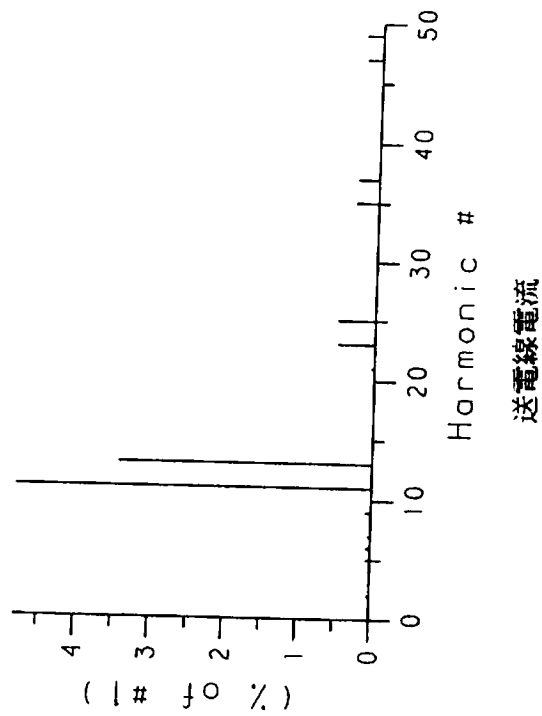
図2-2.4 送電線電流



MHD 發電機負荷電流



變壓器一次側電流



送電線電流

圖2-2.5 周波數成分

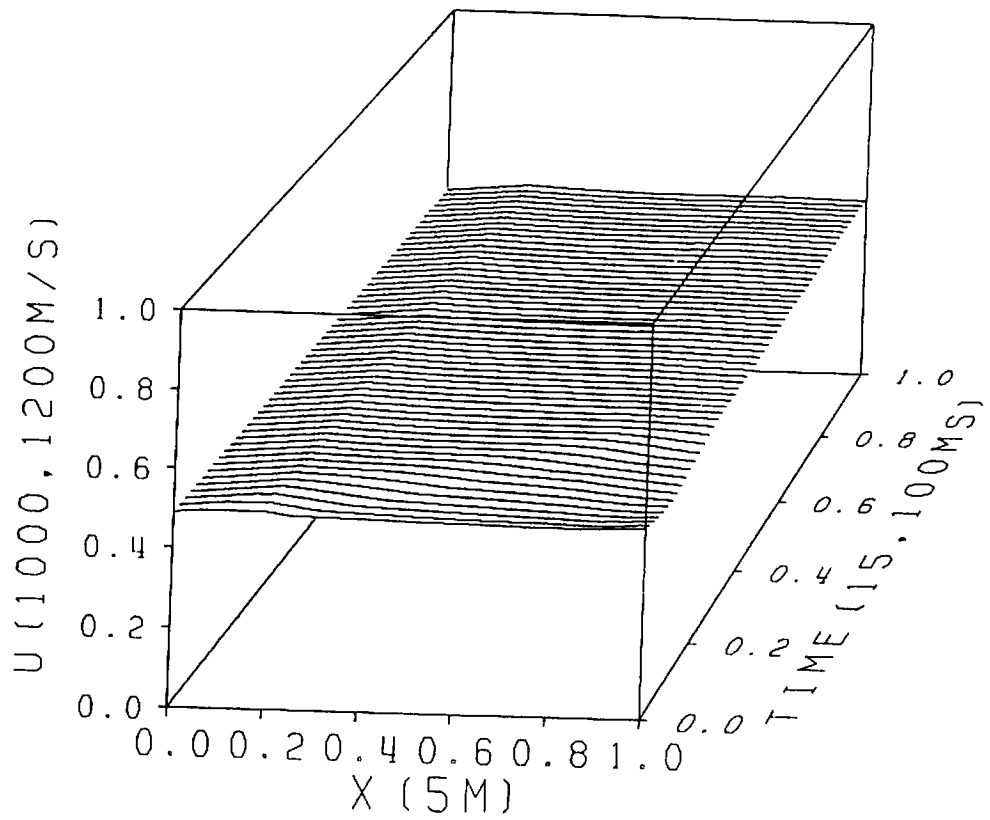


図2-2.8 流速

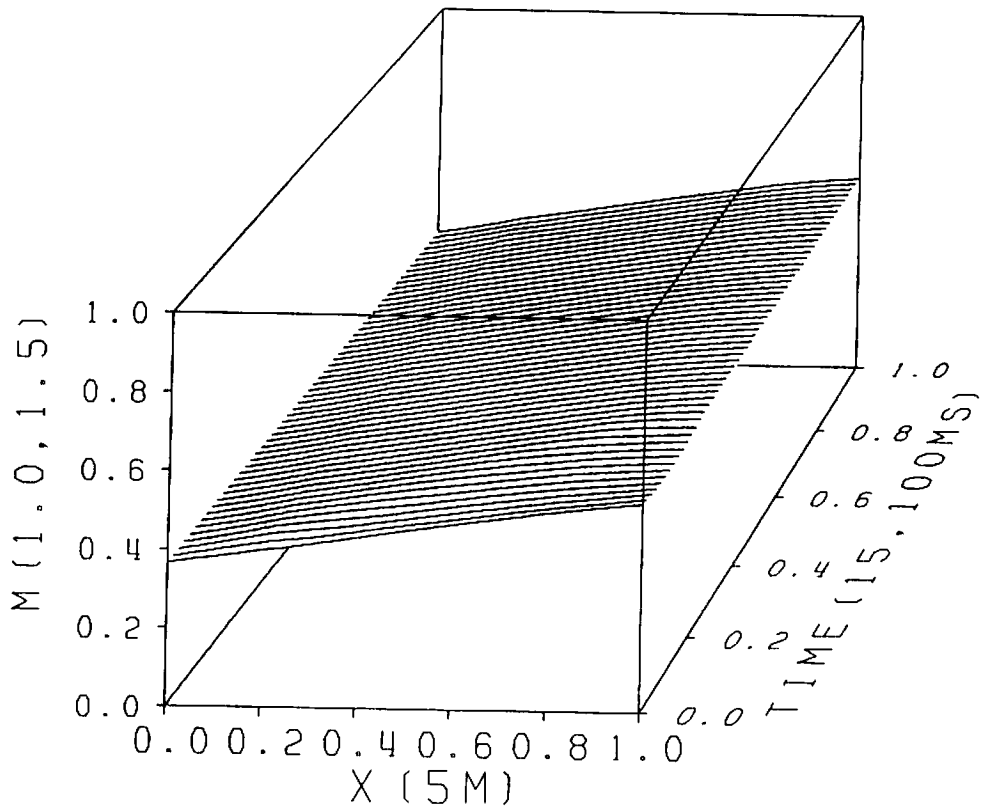


図2-2.9 マッハ数

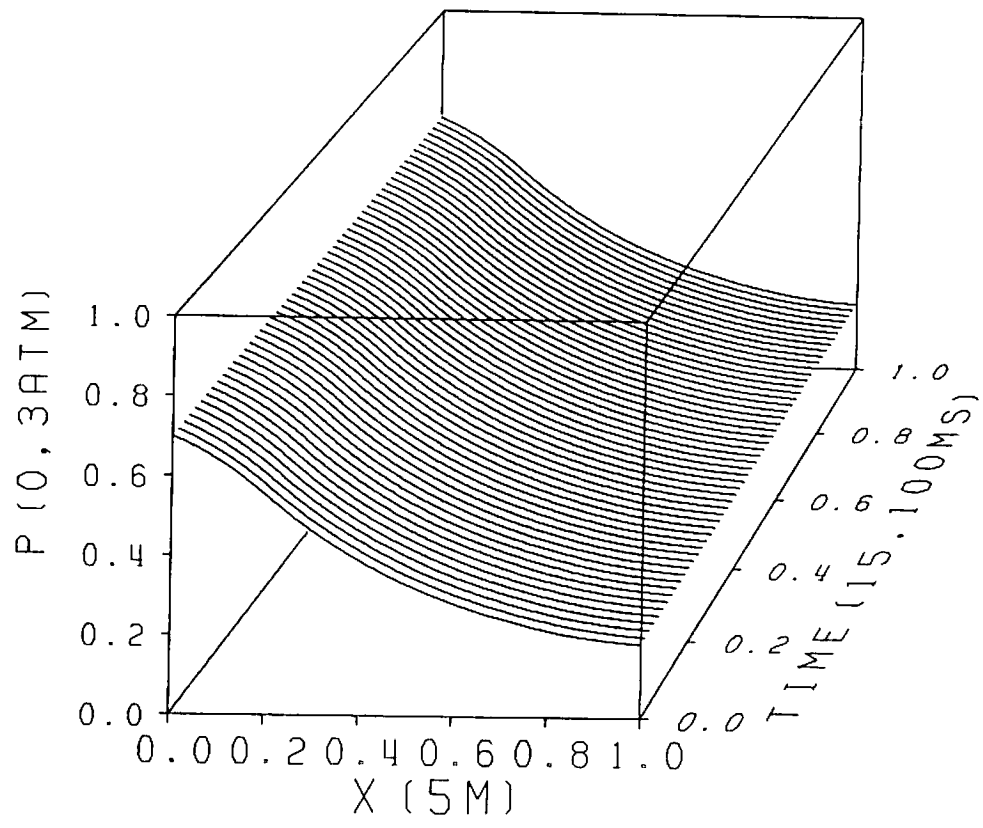


图2-2.6 压力

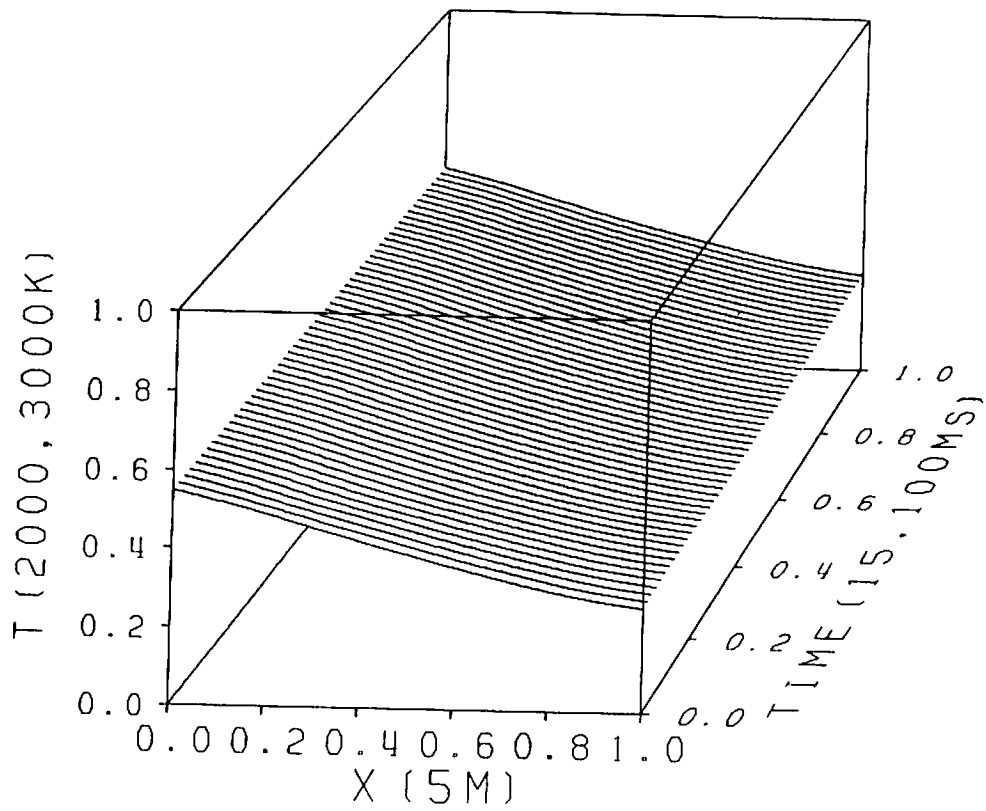


图2-2.7 温度

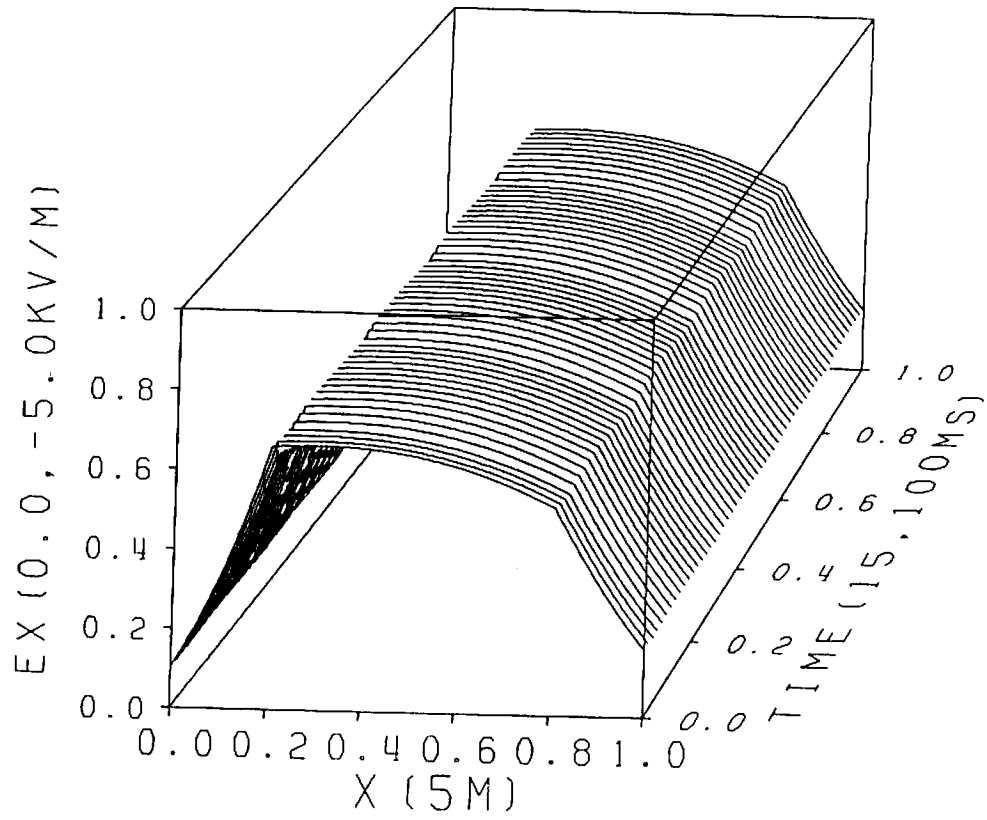


图2-2.10 E_x

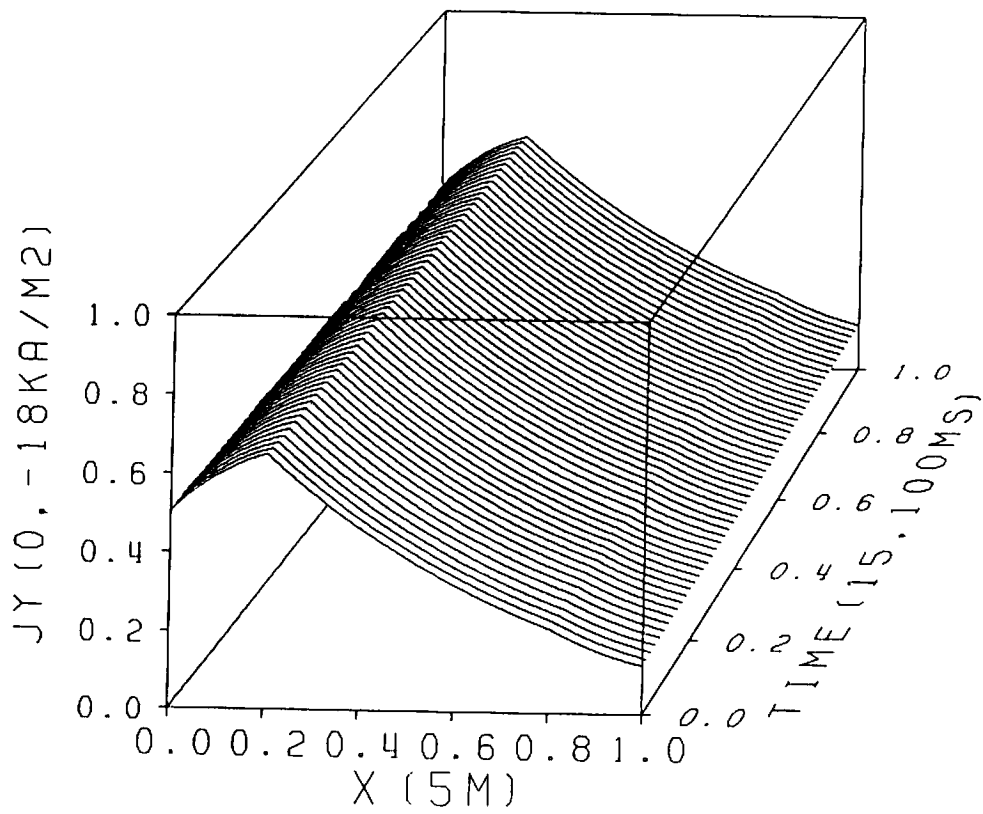


图2-2.11 J_y

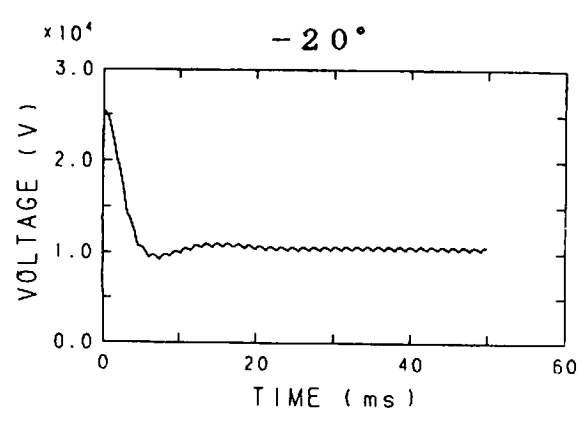
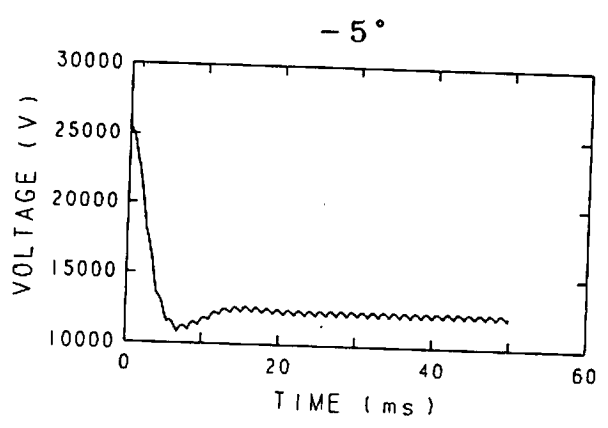
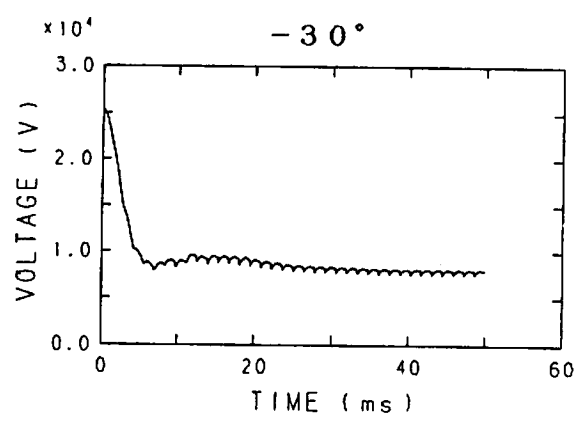
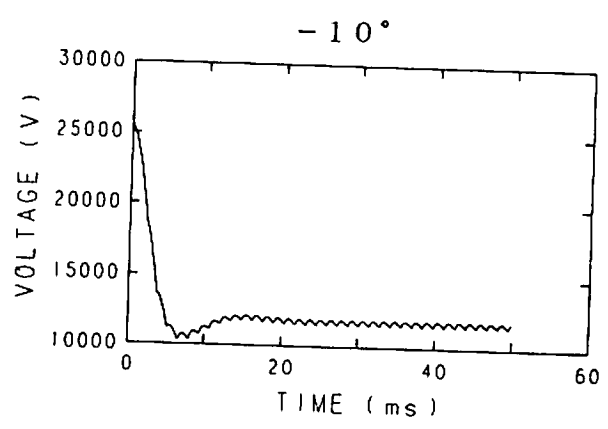
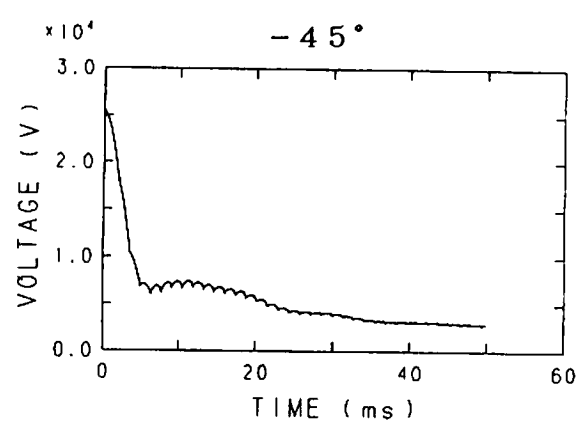
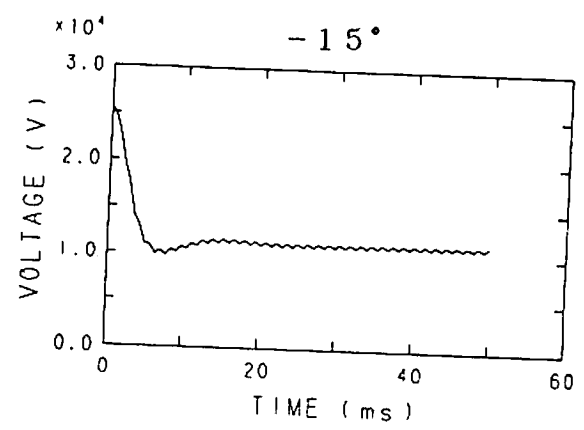
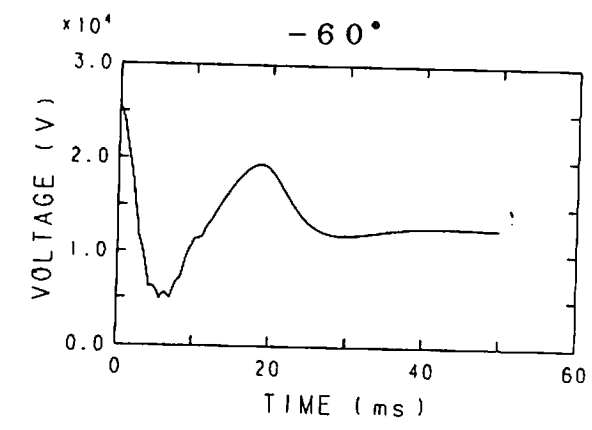
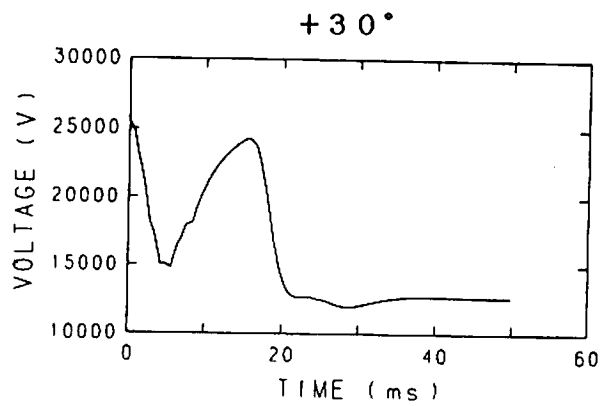
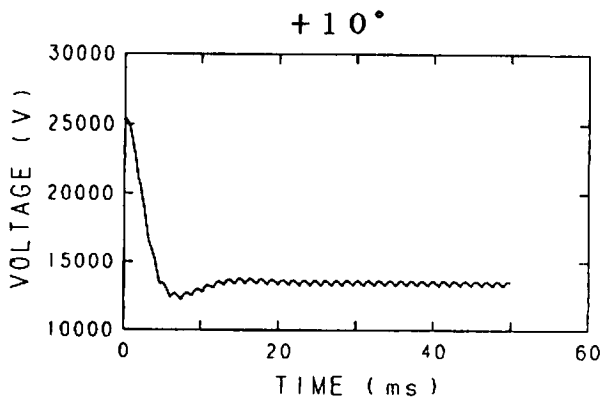
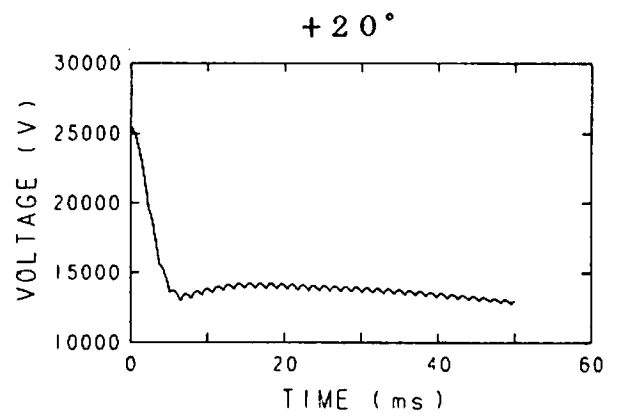
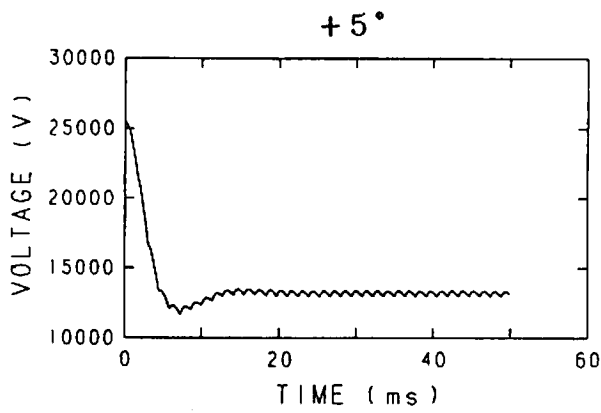
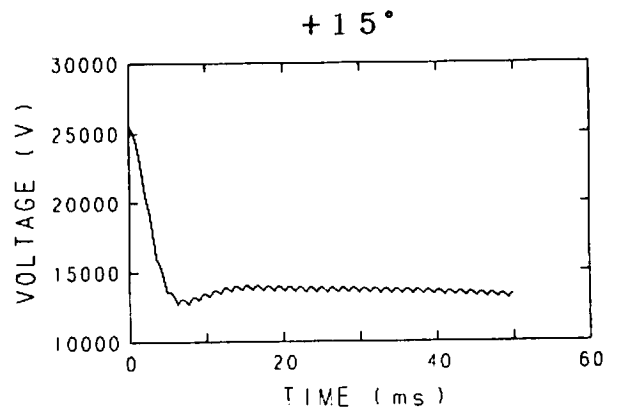
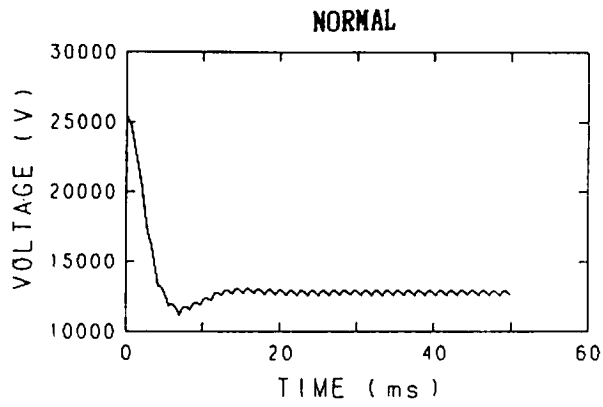


図2-3.1 点弧時期をパラメータとしたMHD発電機端子電圧



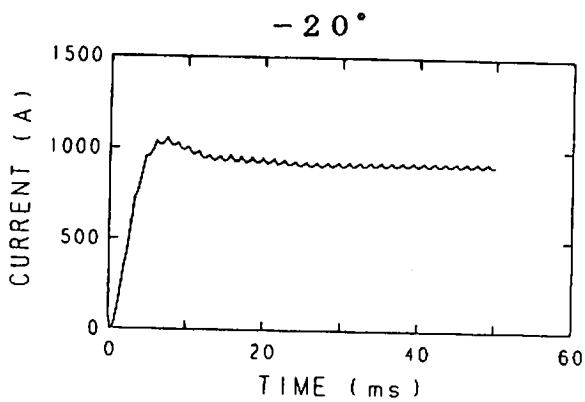
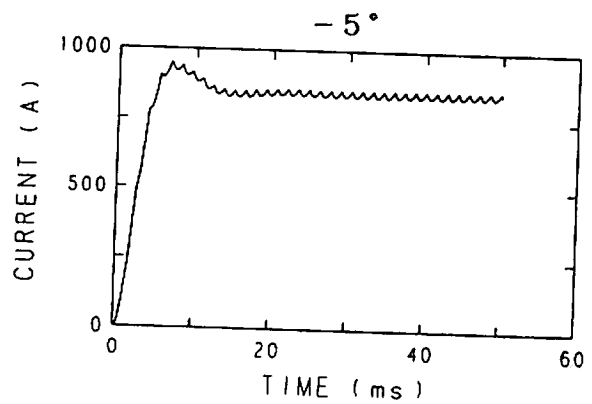
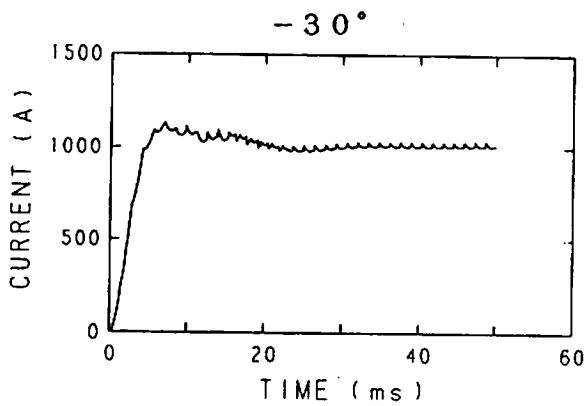
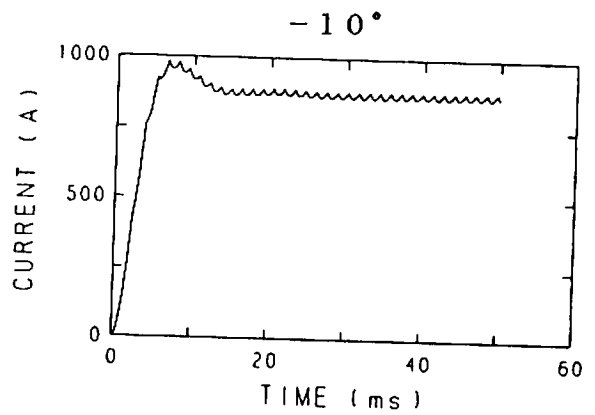
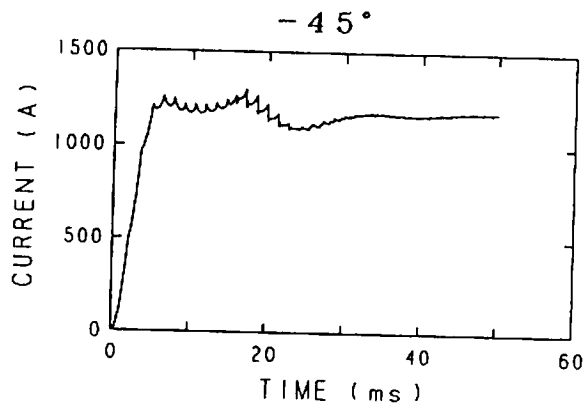
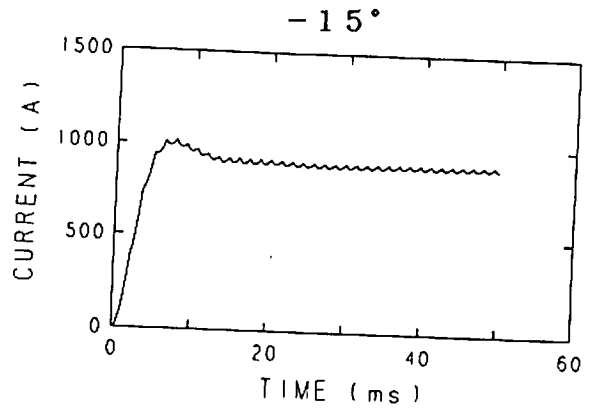
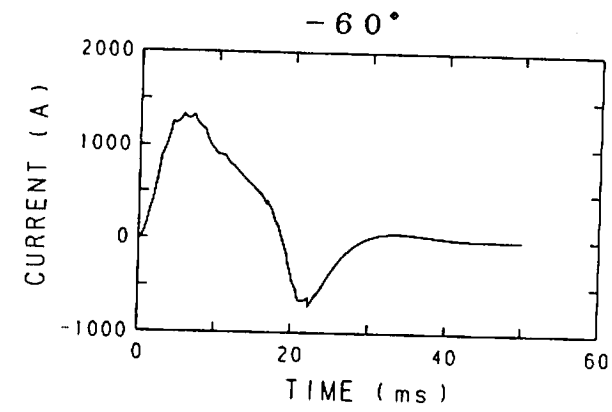
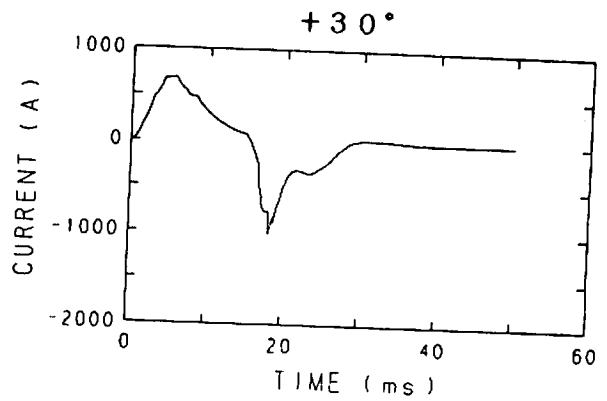
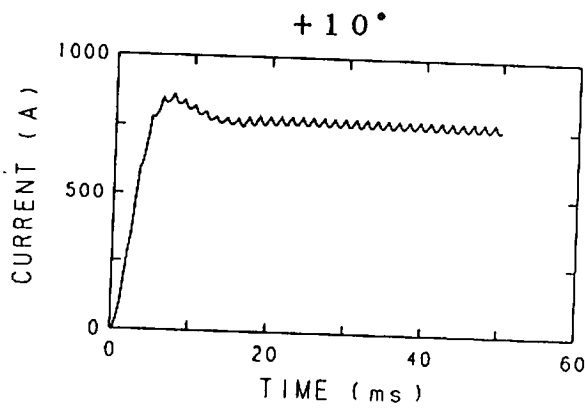
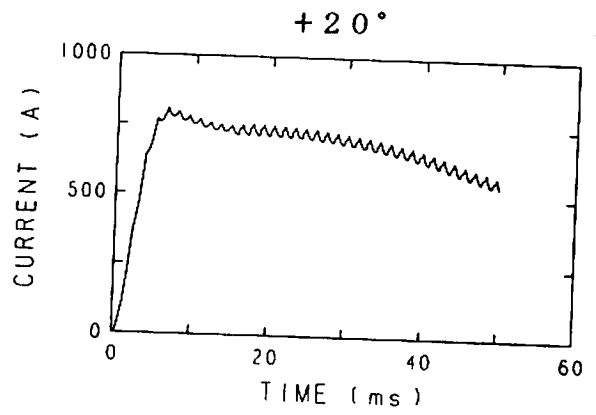
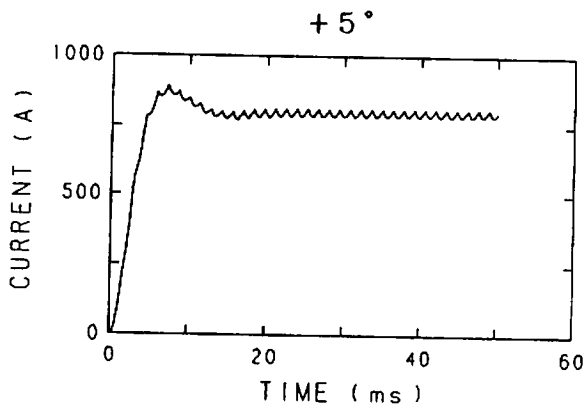
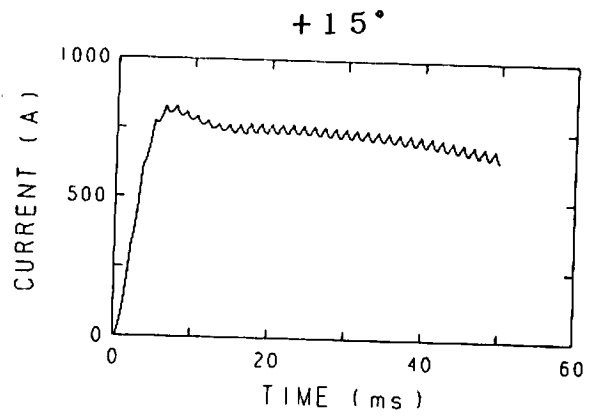
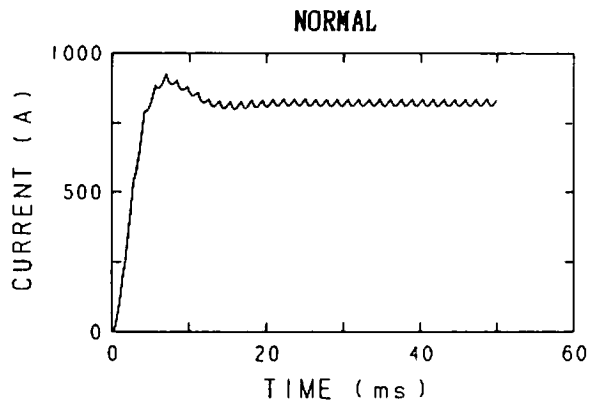


図2-3.2 点弧時期をパラメータとしたMHD発電機負荷電流



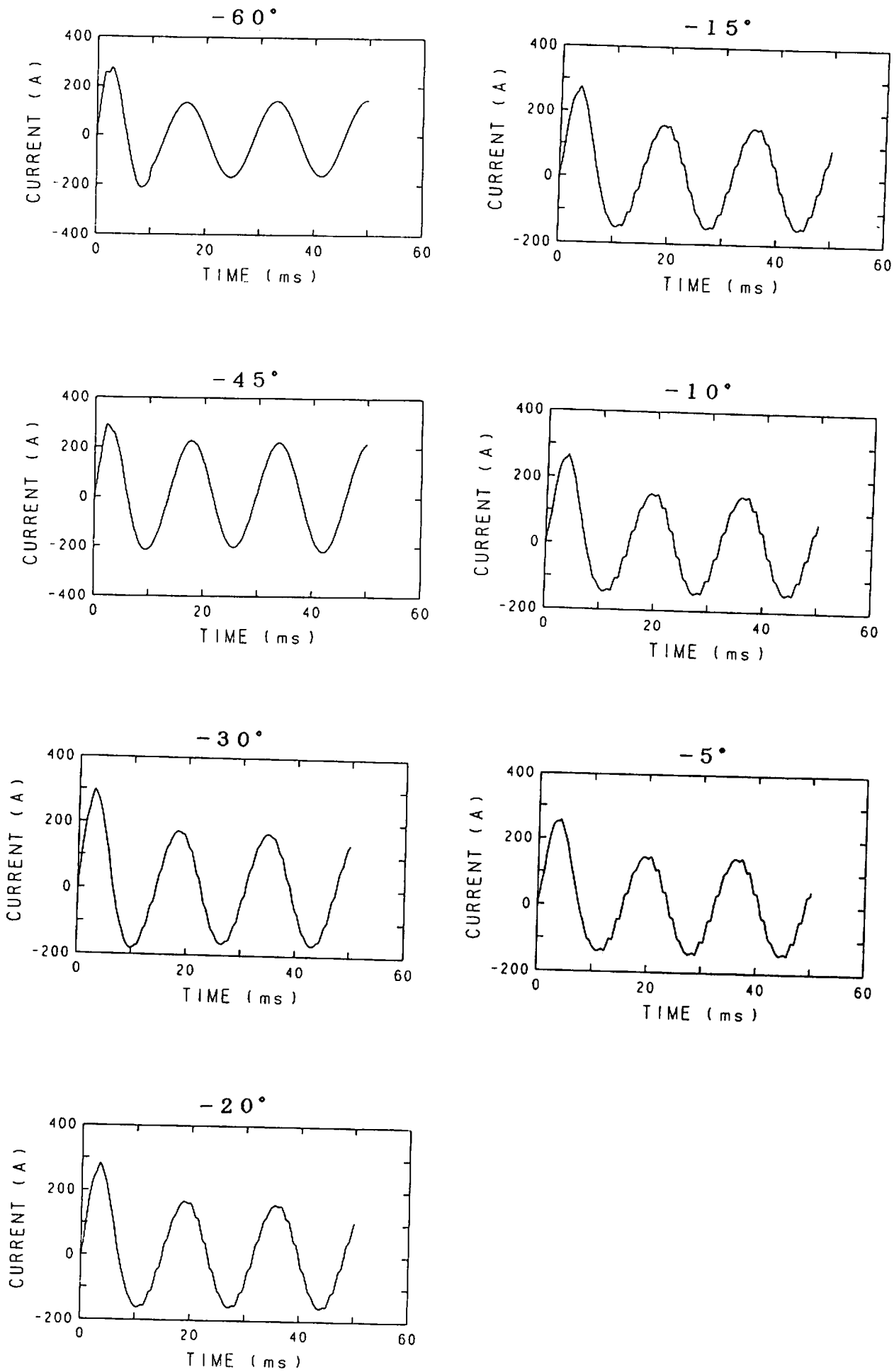
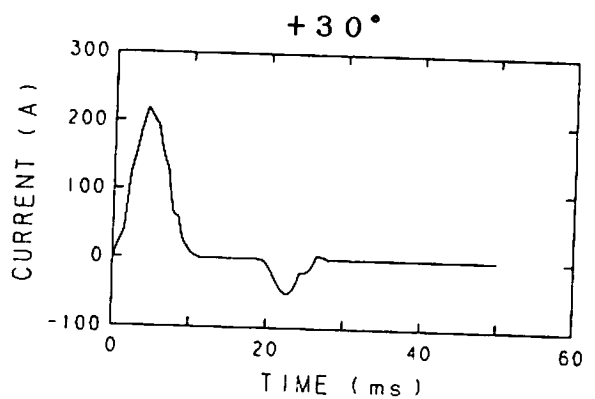
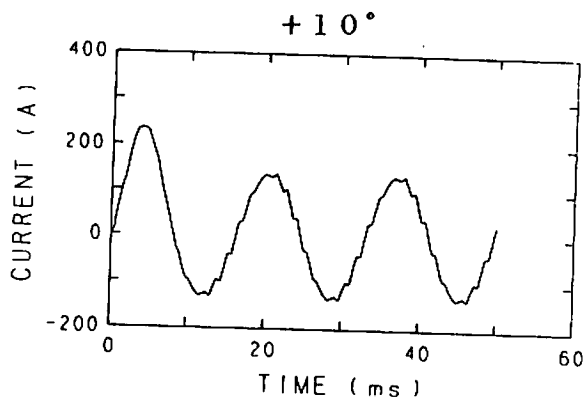
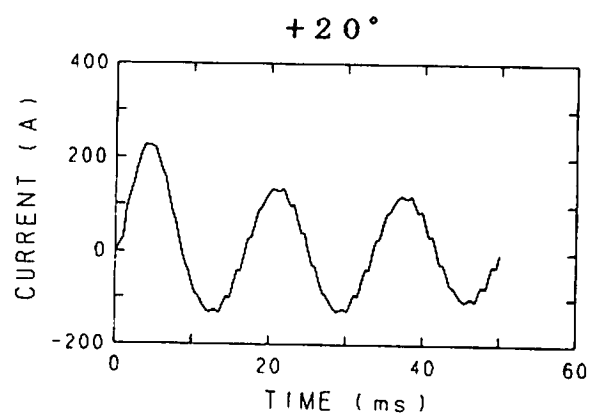
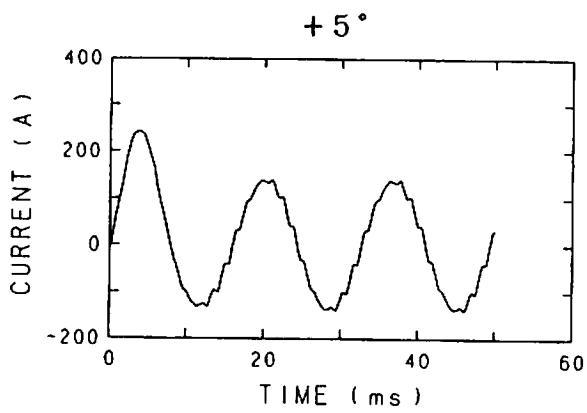
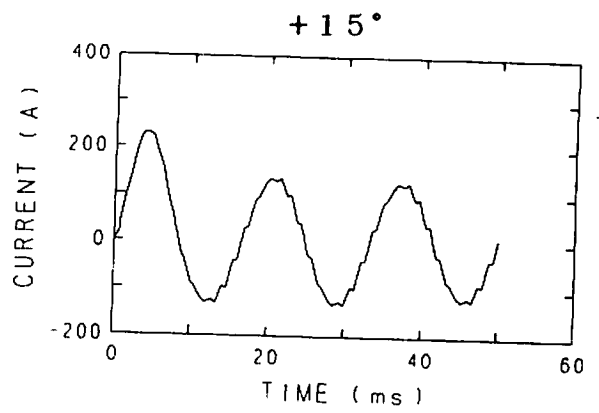
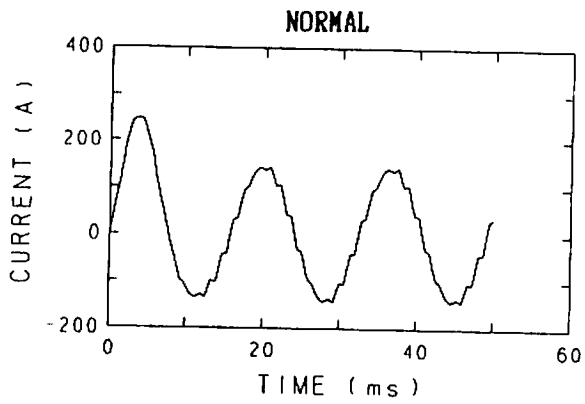


図2-3.3 点弧時期をパラメータとした送電線電流 (a相)



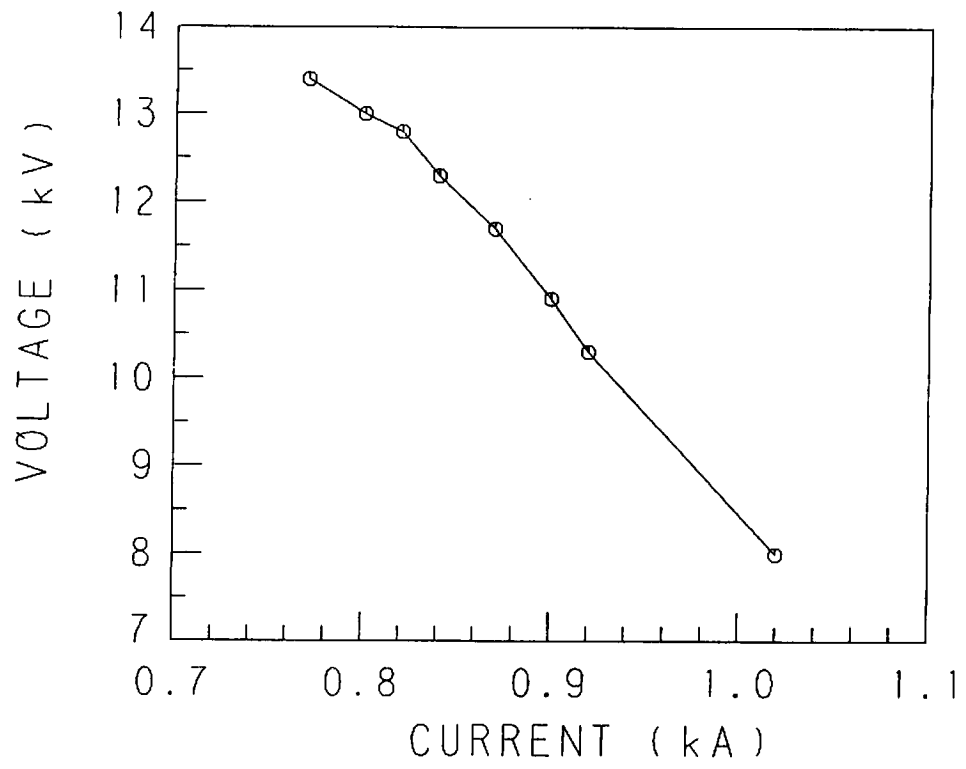


图2-3.5 负荷电流—端子电压特性

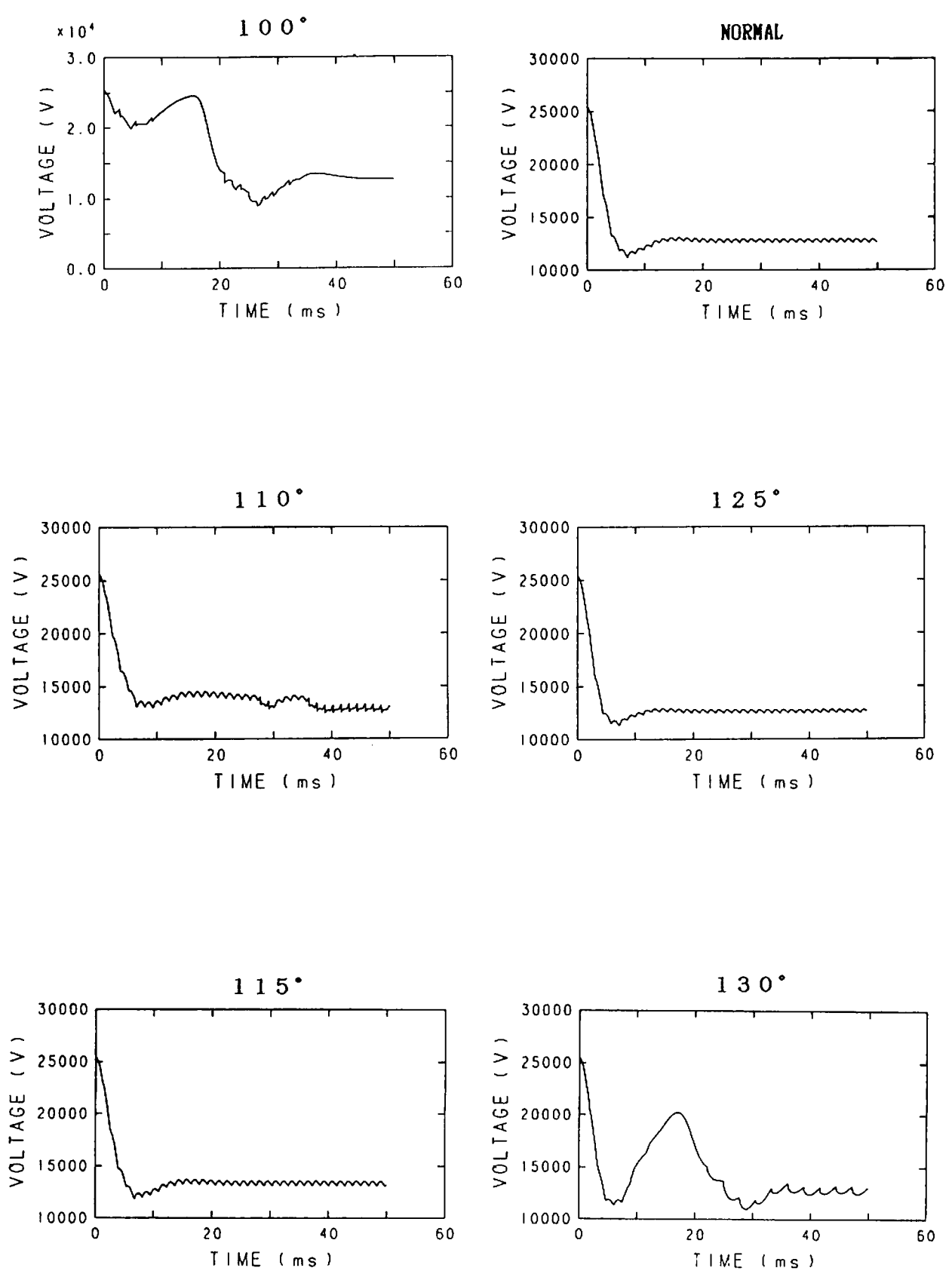


図2-4.1 導通期間をパラメータとしたMHD発電機端子電圧

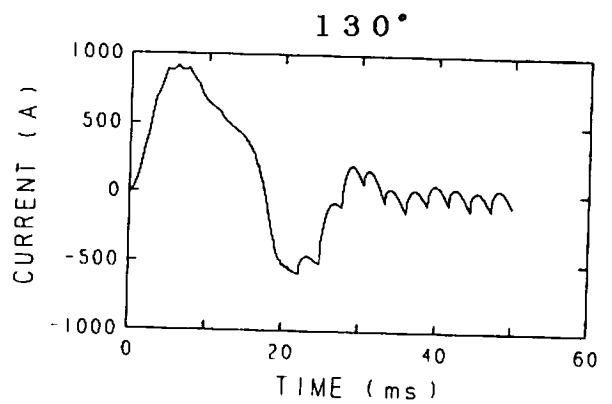
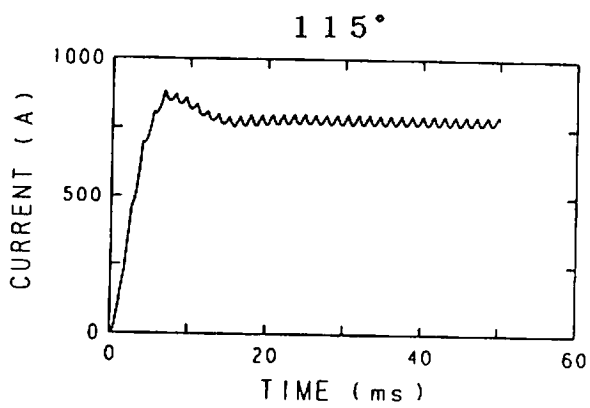
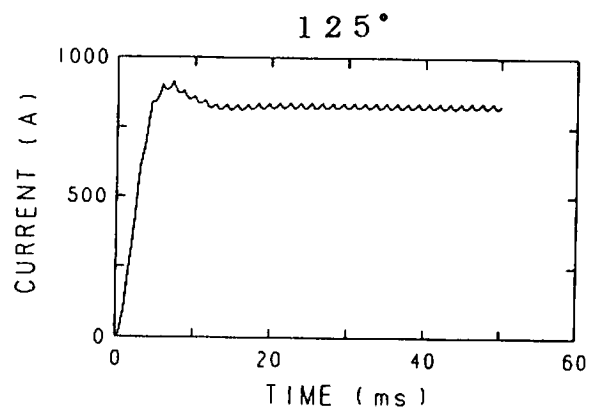
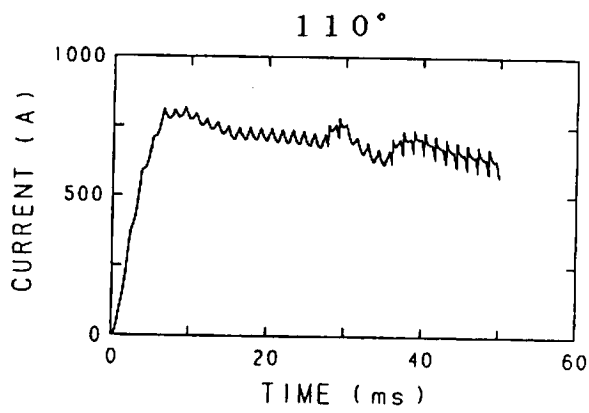
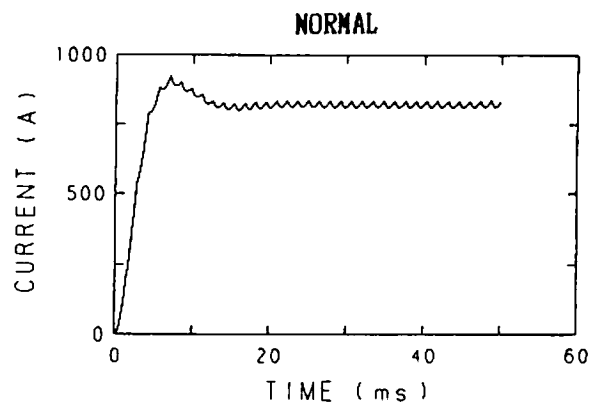
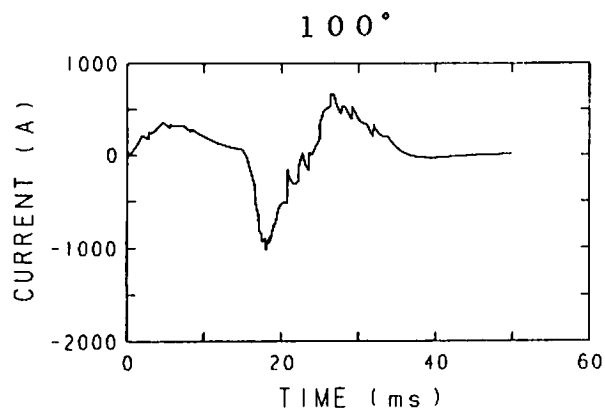


図2-4.2 導通期間をパラメータとしたMHD発電機負荷電流

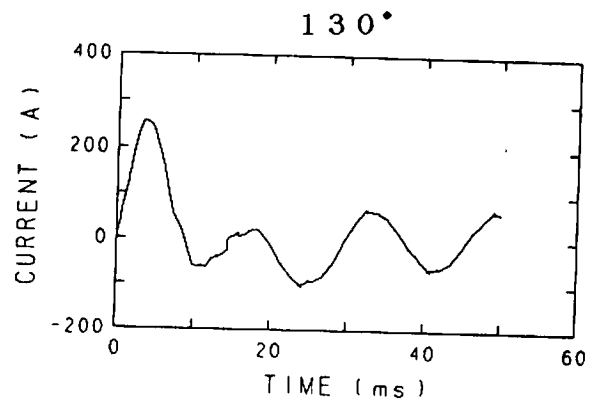
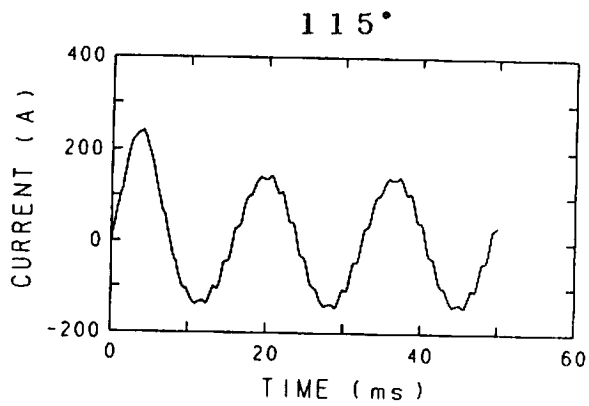
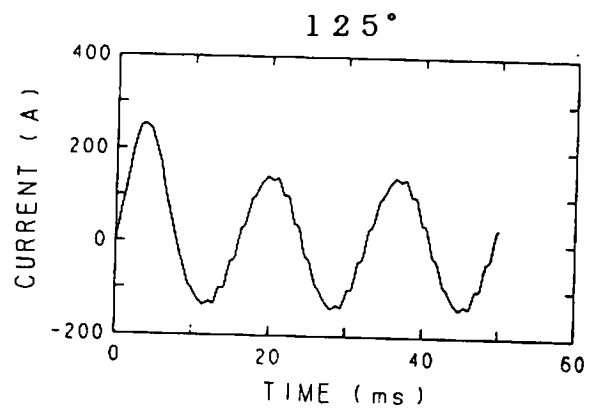
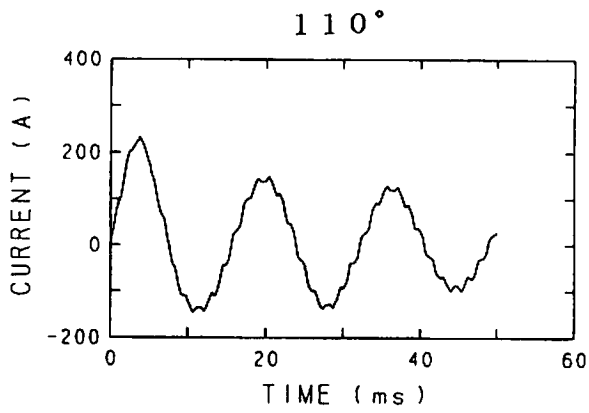
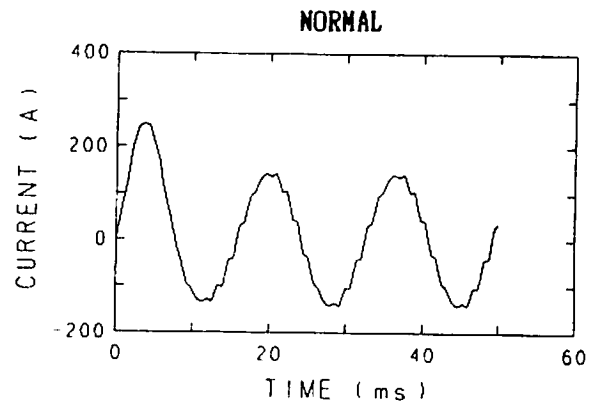
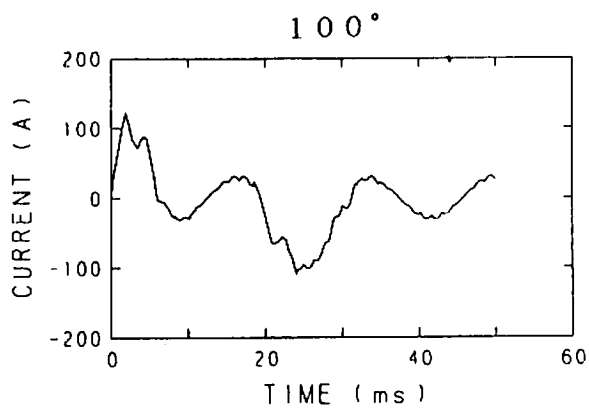


図2-4.3 導通期間をパラメータとした送電線電流 (a相)

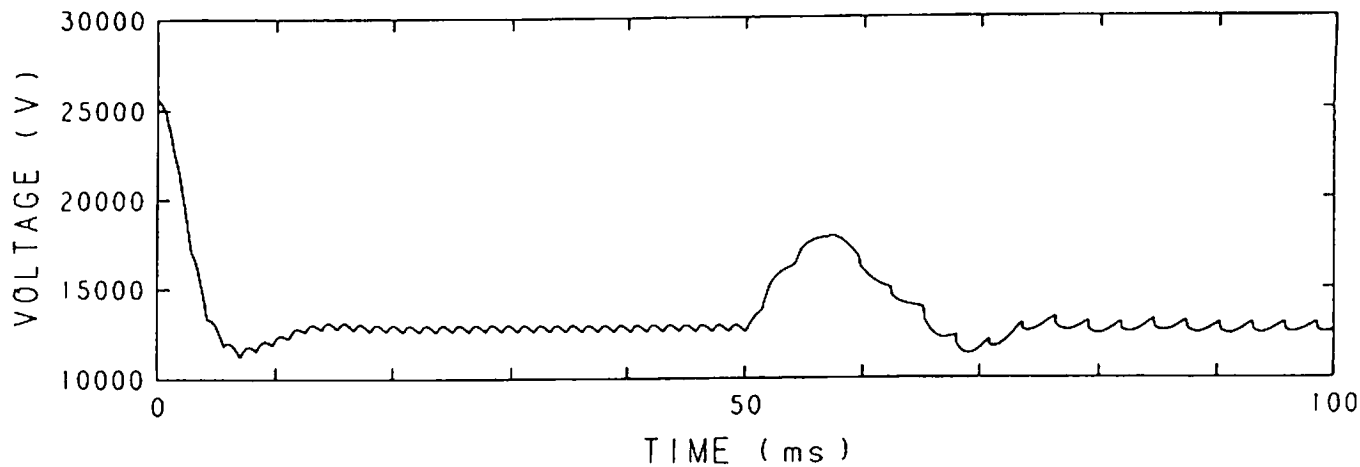


図2-5(1).1 点弧失敗事故時のMHD発電機端子電圧

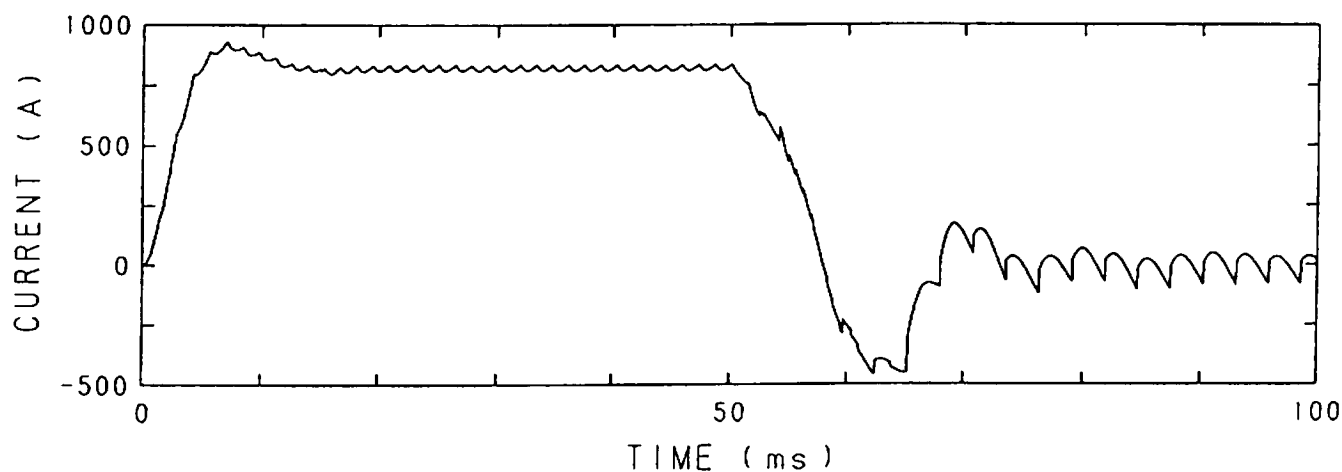


図2-5(1).2 点弧失敗事故時のMHD発電機負荷電流

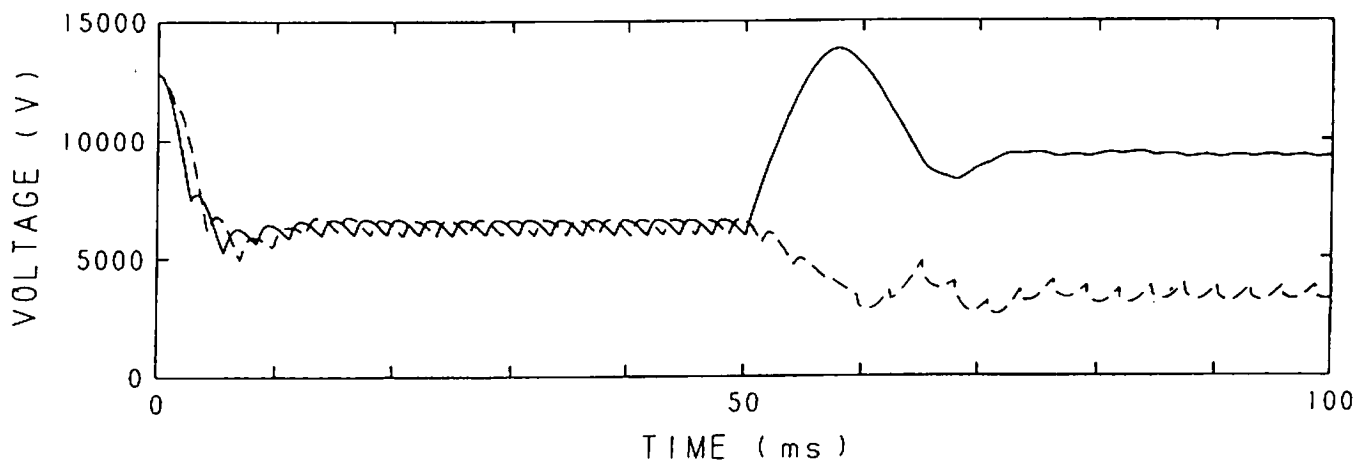


図2-5(1).3 点弧失敗事故時の分圧コンデンサの電圧

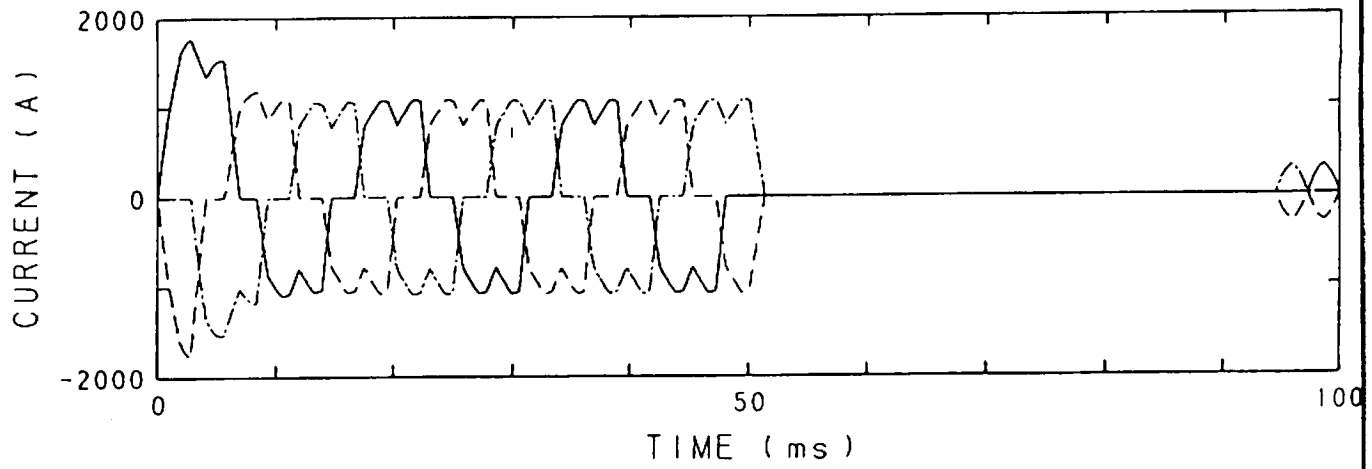


図2-5(1).4 点弧失敗事故時の上側変圧器一次側電流

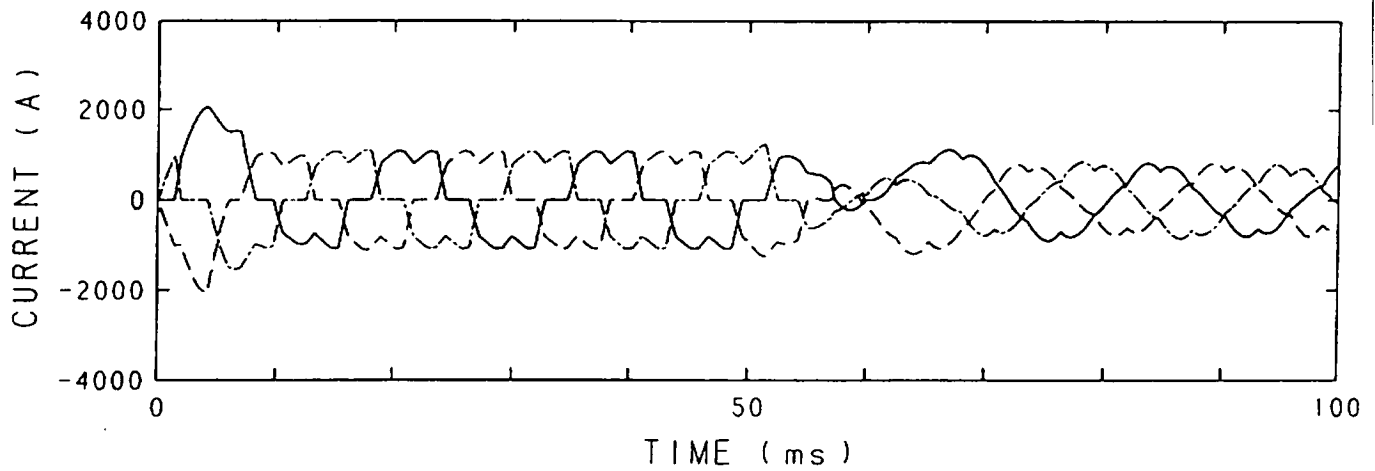


図2-5(1).5 点弧失敗事故時の下側変圧器一次側電流

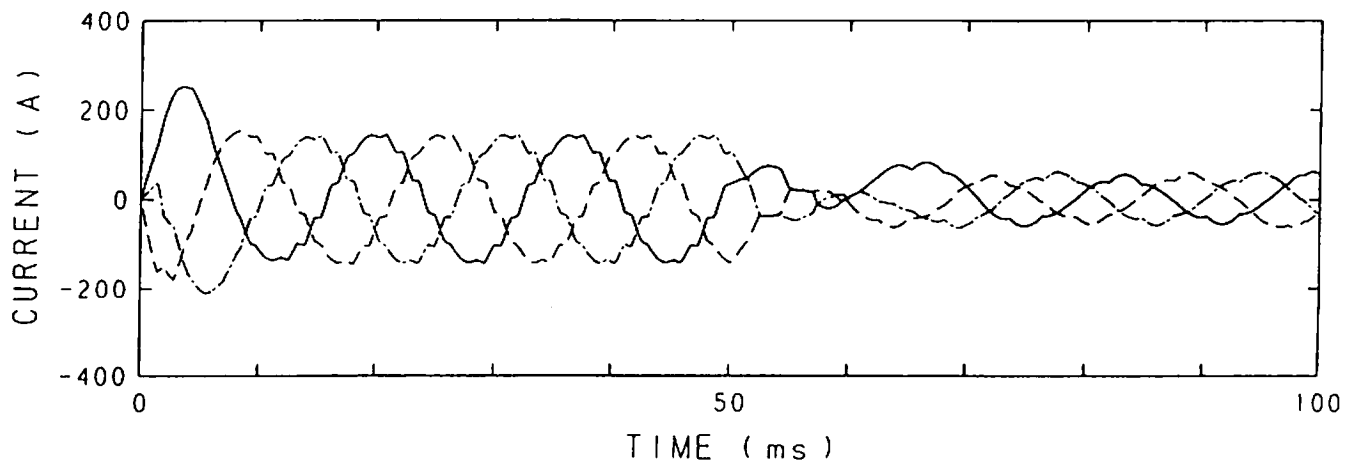


図2-5(1).6 点弧失敗事故時の送電線電流

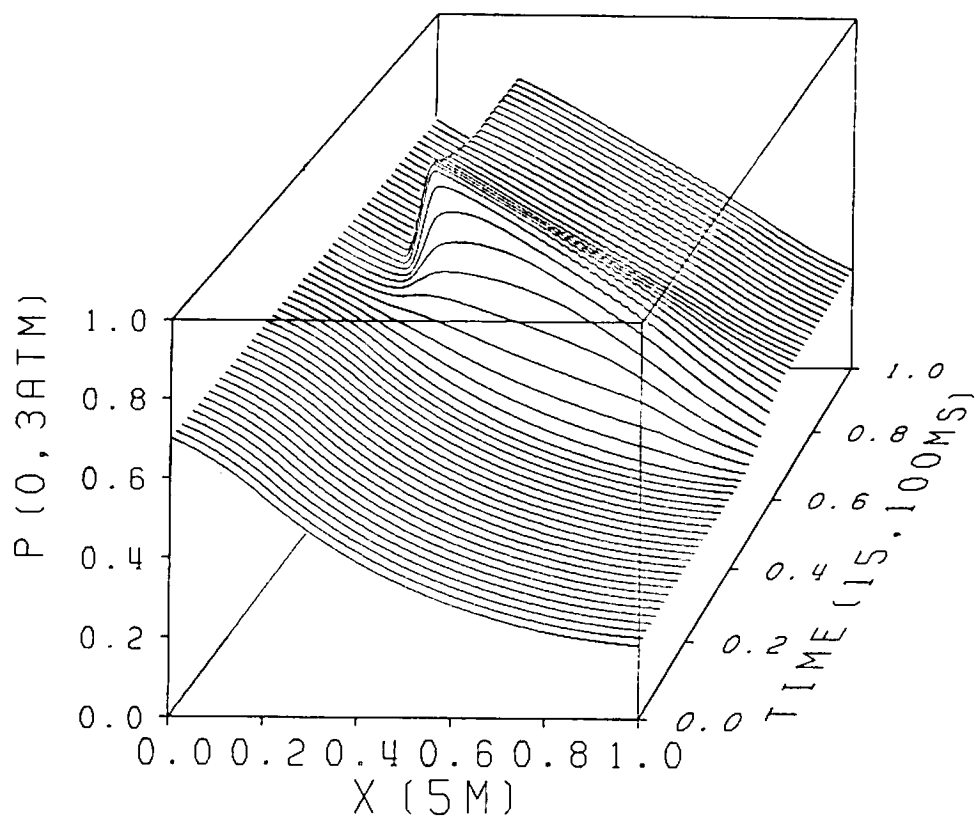


図2-5(1).7 点弧失敗事故時の流体の圧力

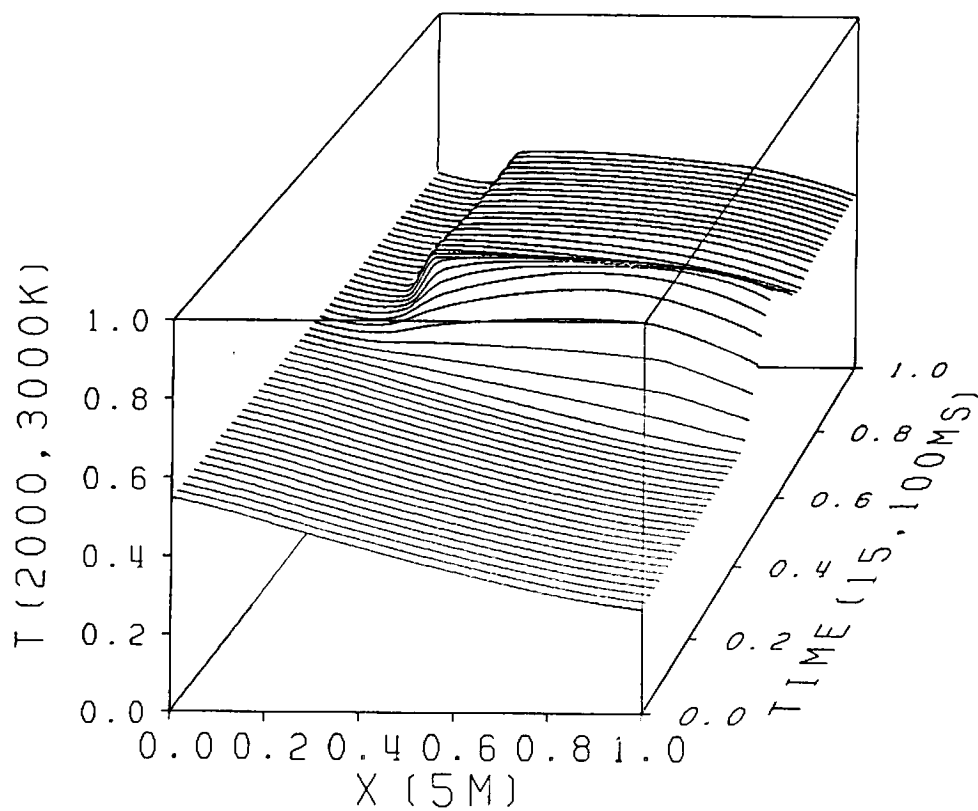


図2-5(1).8 点弧失敗事故時の流体の温度

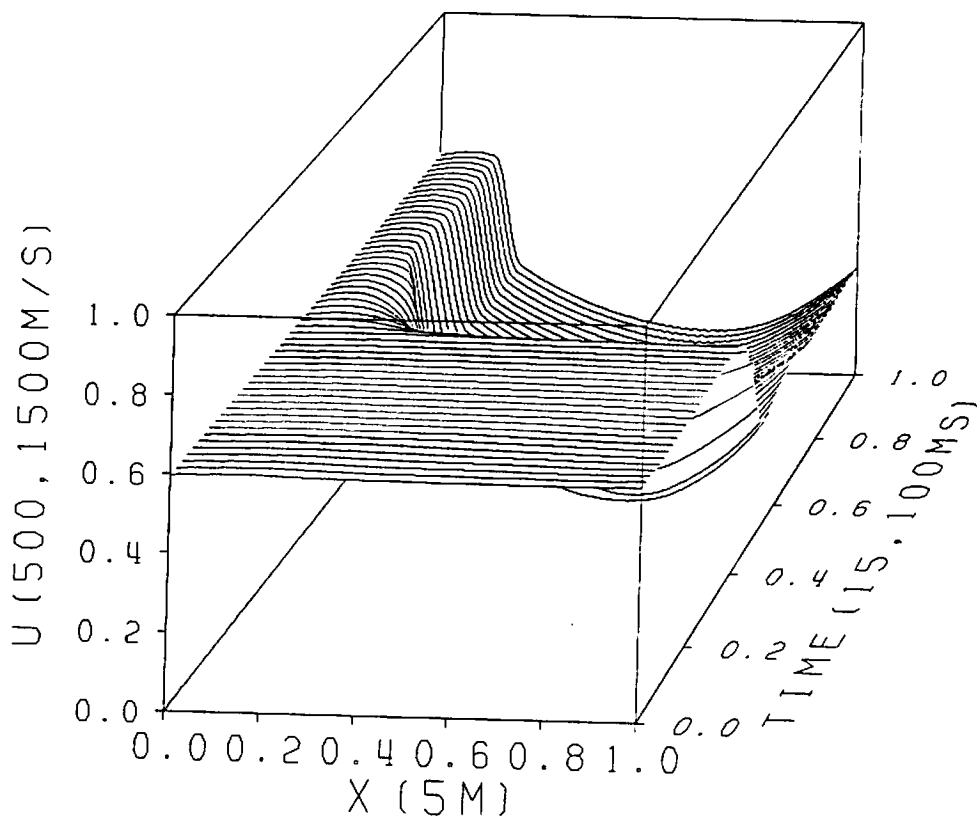


図2-5(1).9 点弧失敗事故時の流速

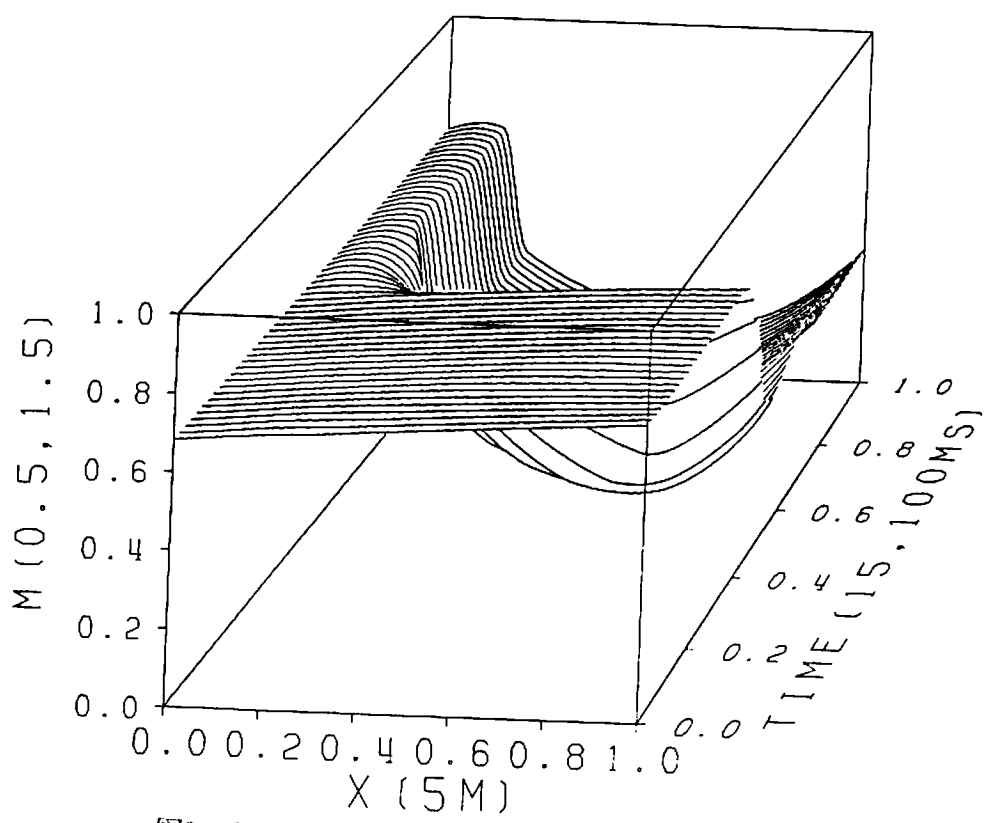


図2-5(1).10 点弧失敗事故時のマッハ数

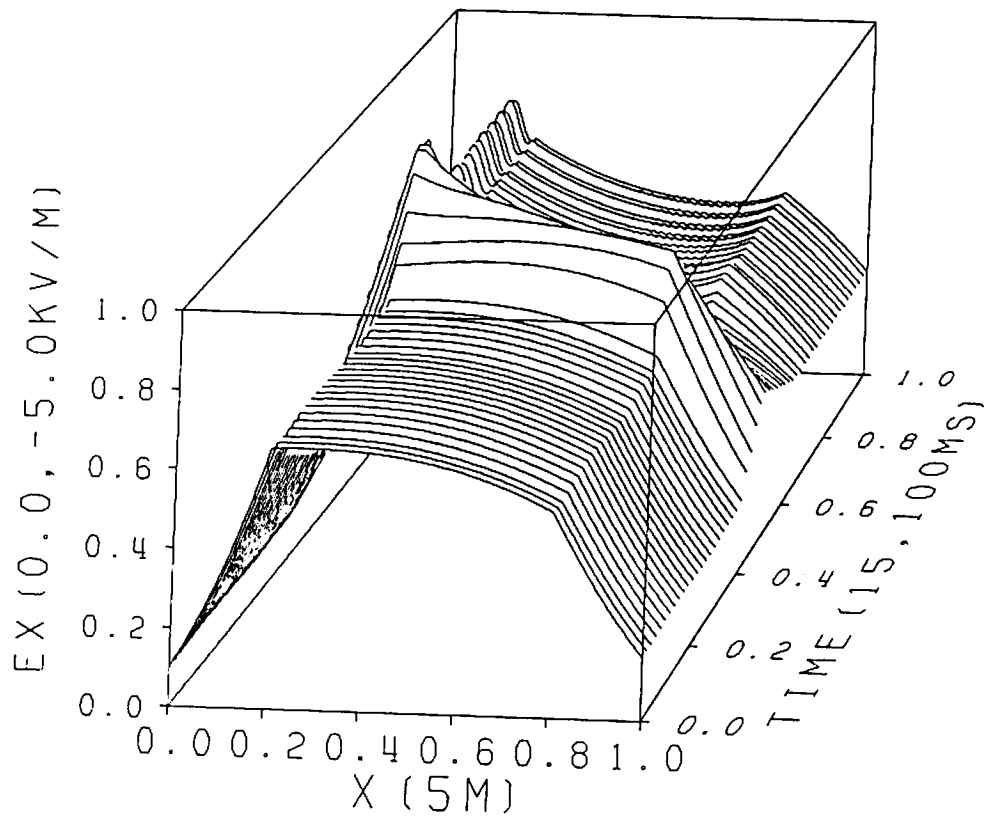


図2-5(1).11 点弧失敗事故時の E_x

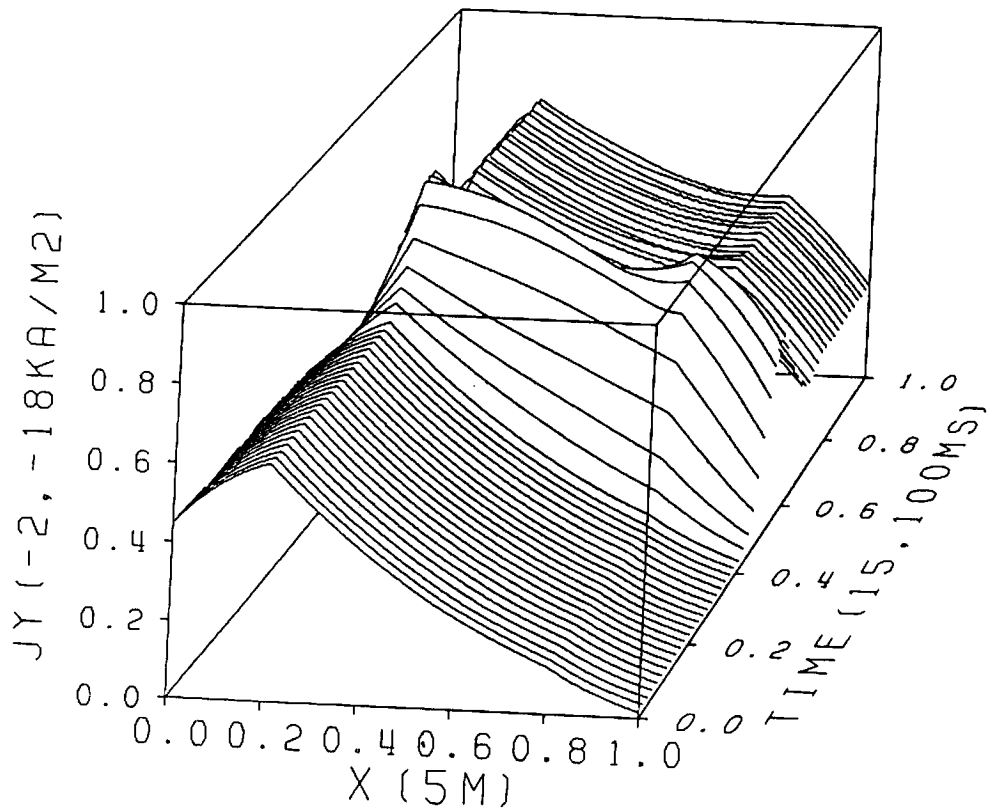


図2-5(1).12 点弧失敗事故時の J_y

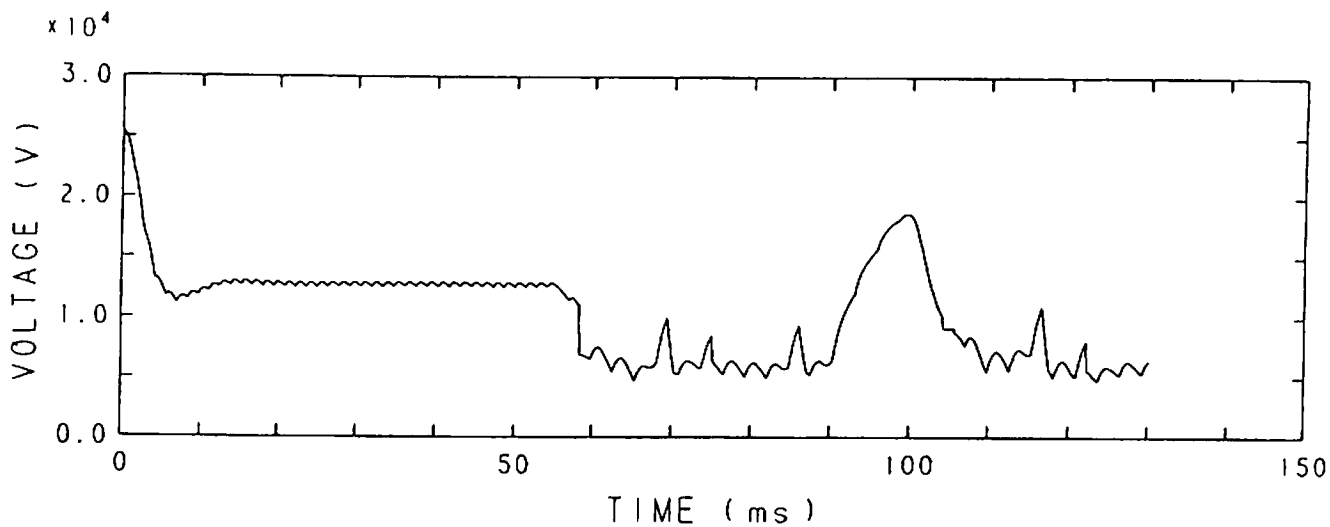


図2-5(2).1 転流失敗事故時のMHD発電機端子電圧

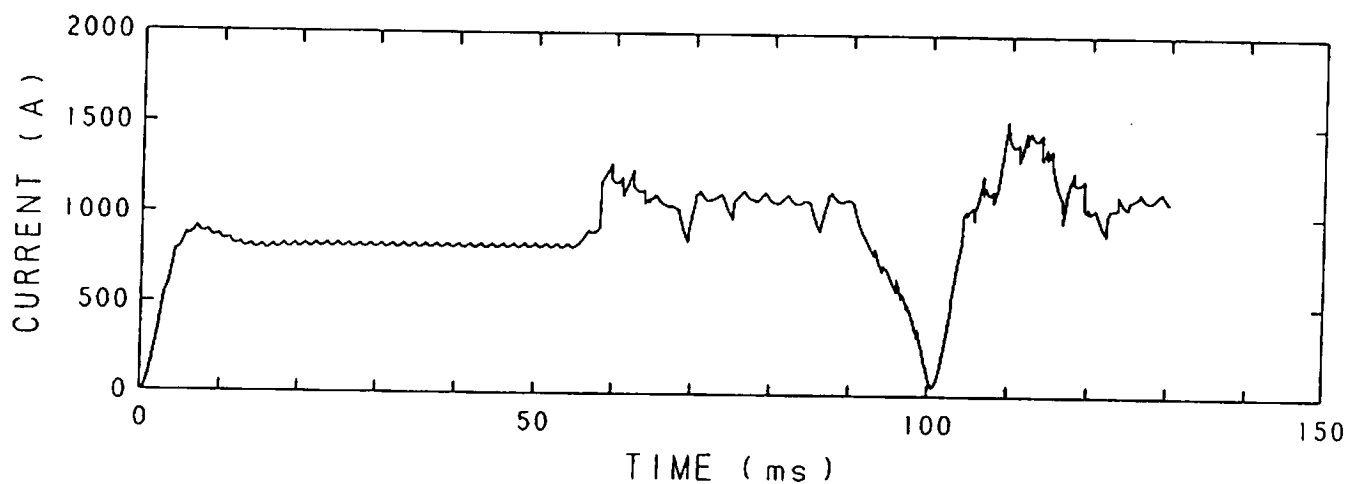


図2-5(2).2 転流失敗事故時のMHD発電機負荷電流

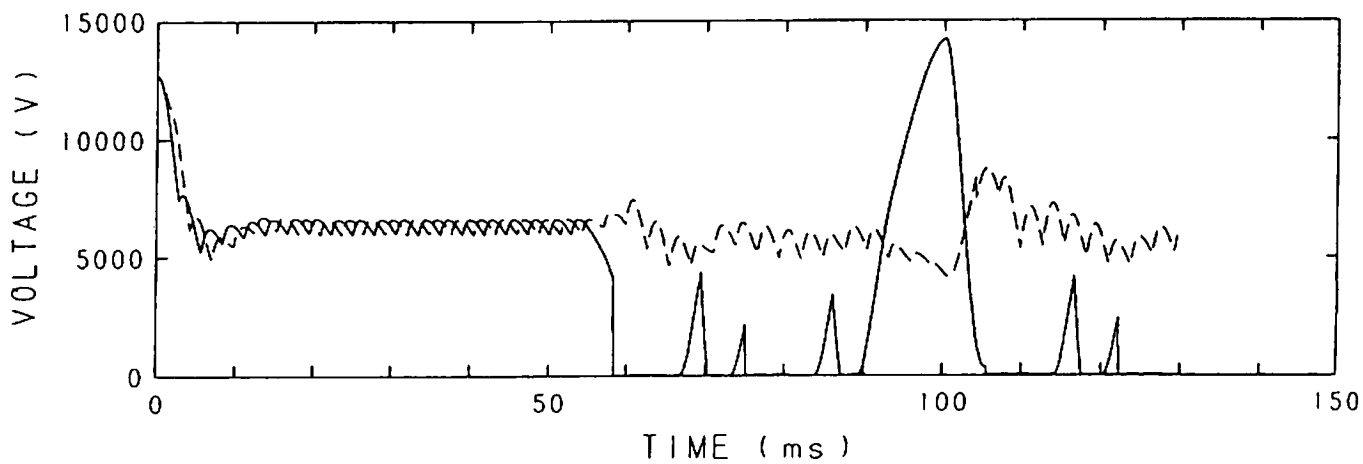


図2-5(2).3 転流失敗事故時の分圧コンデンサの電圧

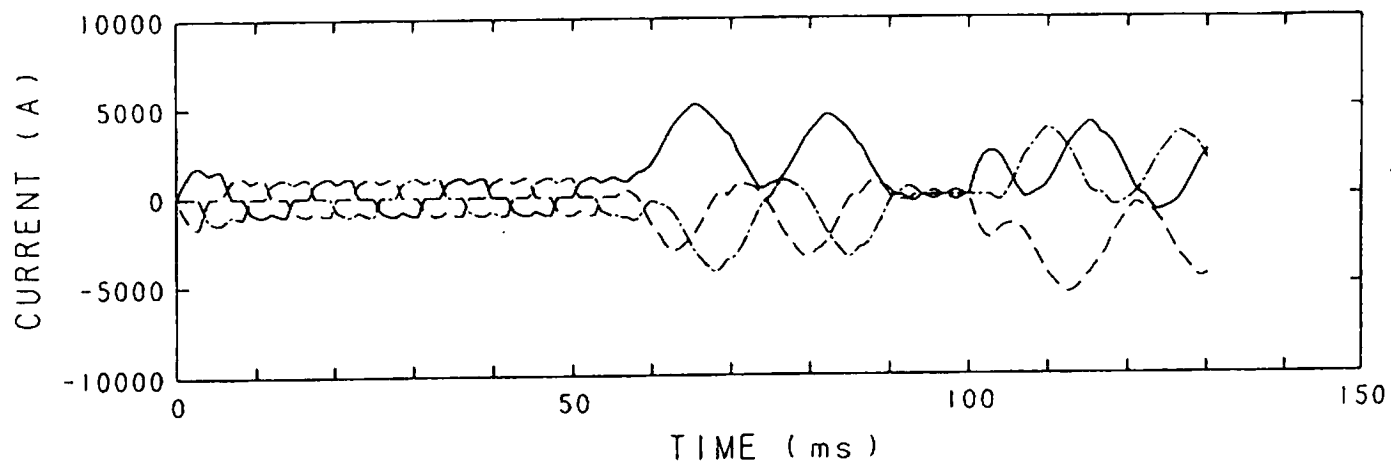


図2-5(2).4 転流失敗事故時の上側変圧器一次側電流

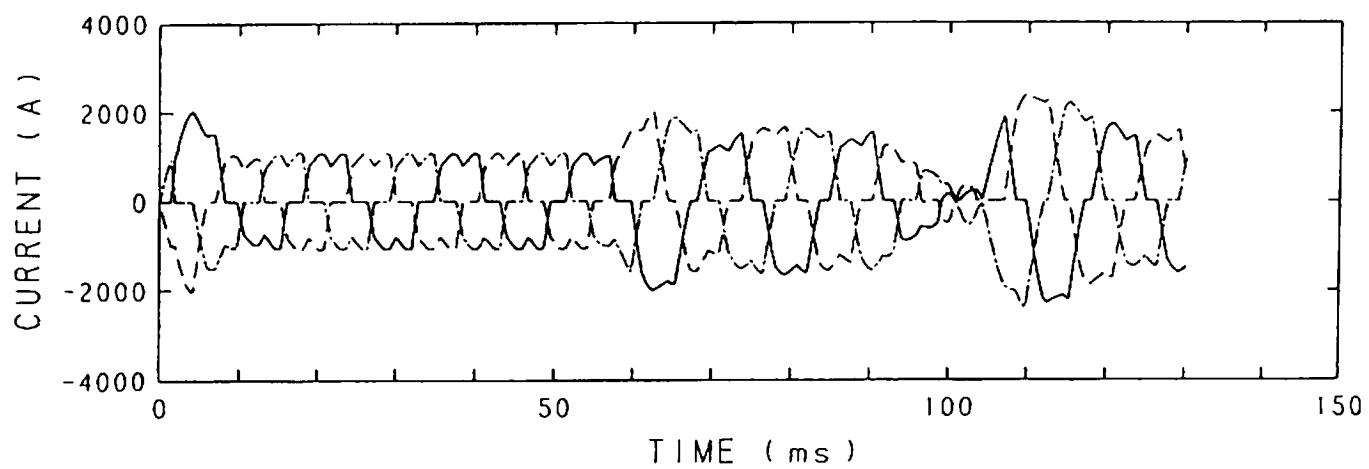


図2-5(2).5 転流失敗事故時の下側変圧器一次側電流

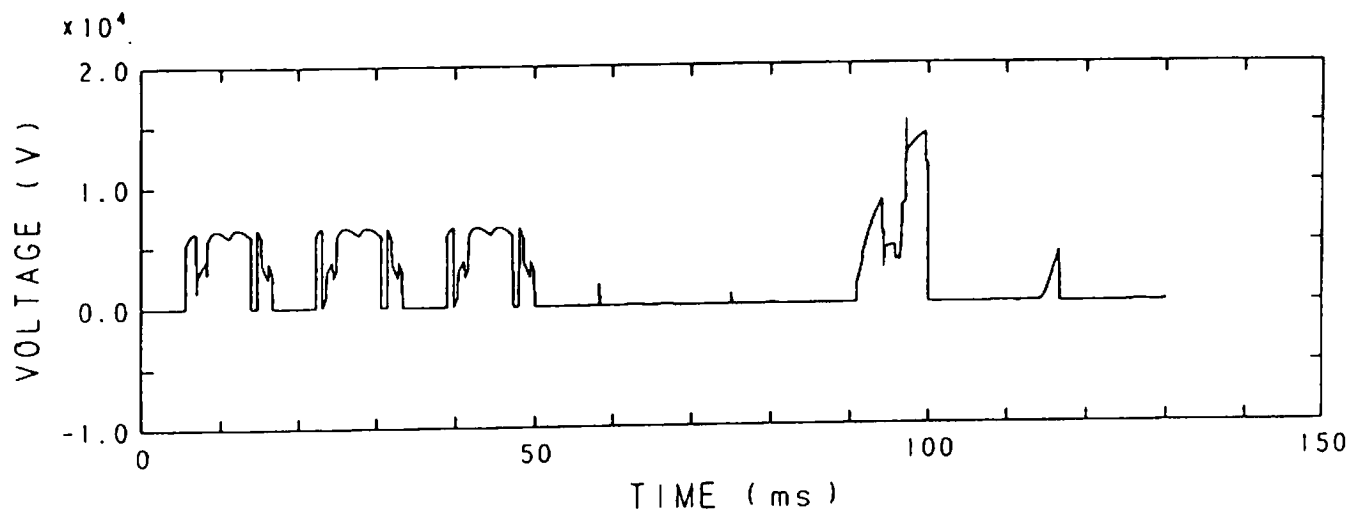


図2-5(2).6 転流失敗事故時のメインサイリスタの電圧

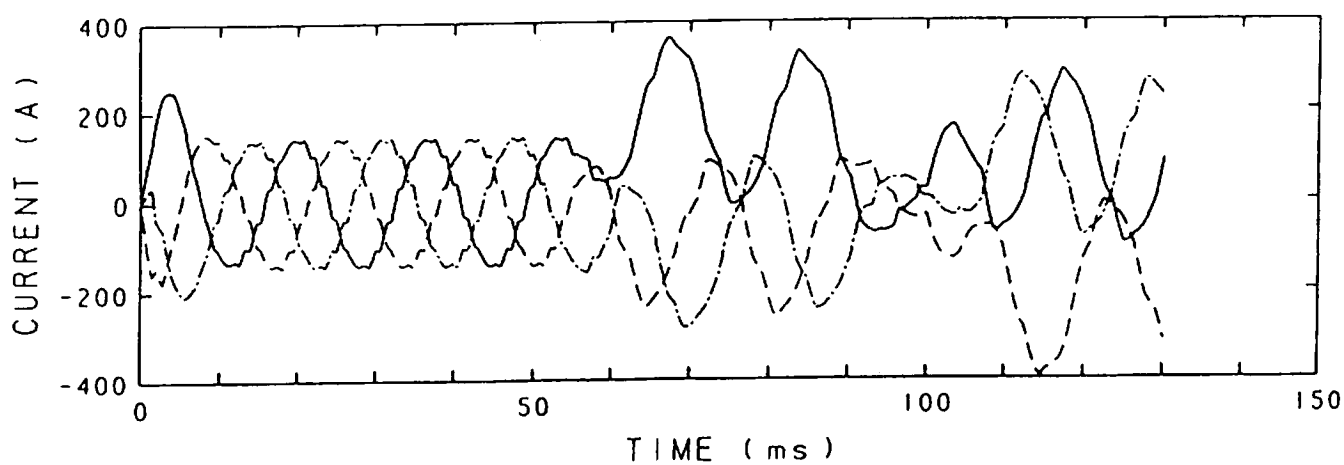


図2-5(2).7 転流失敗事故時の送電線電流

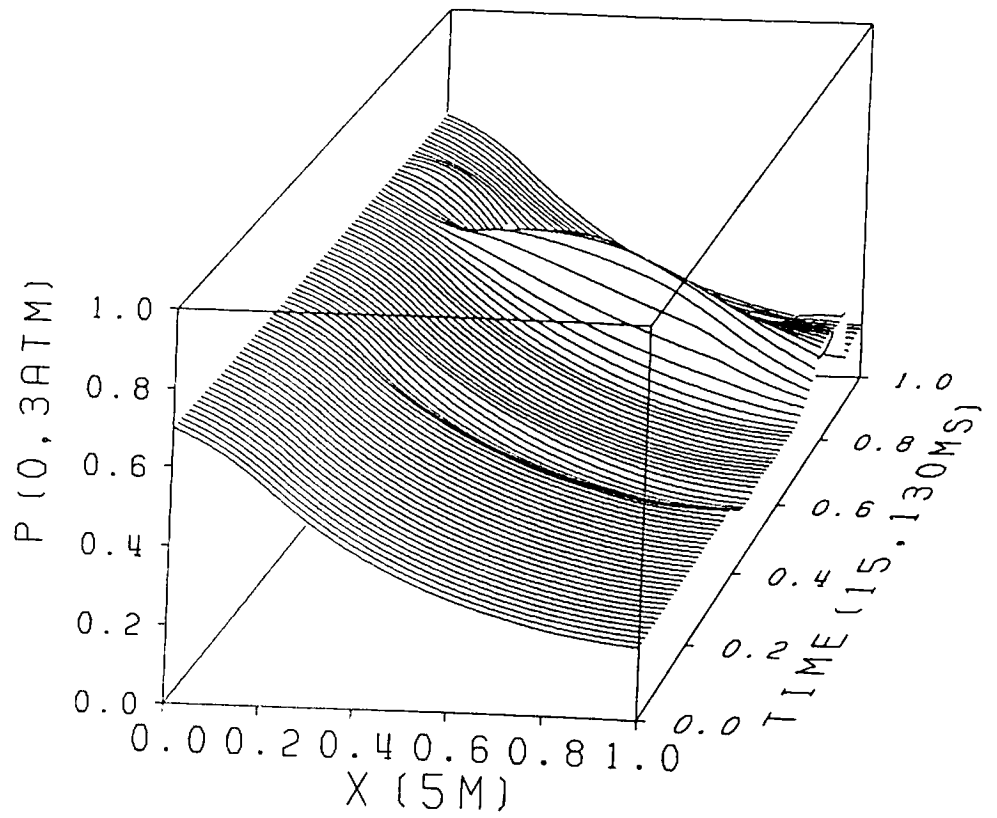


図2-5(2).8 転流失敗事故時の流体の圧力

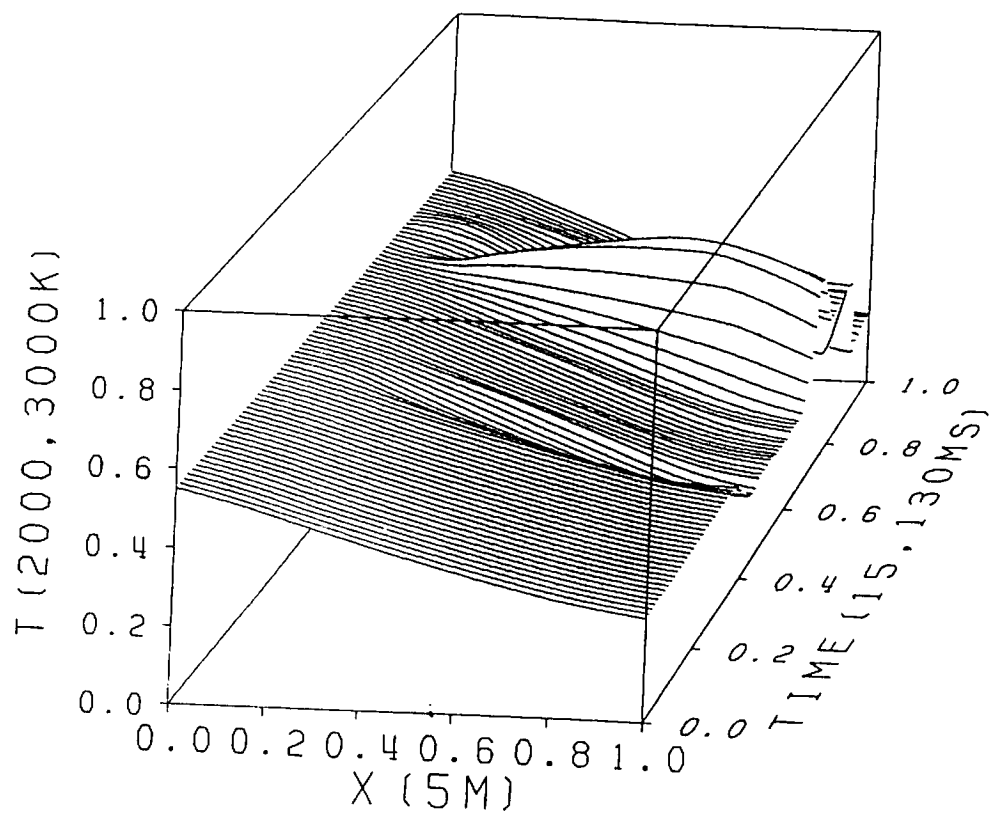


図2-5(2).9 転流失敗事故時の流体の温度

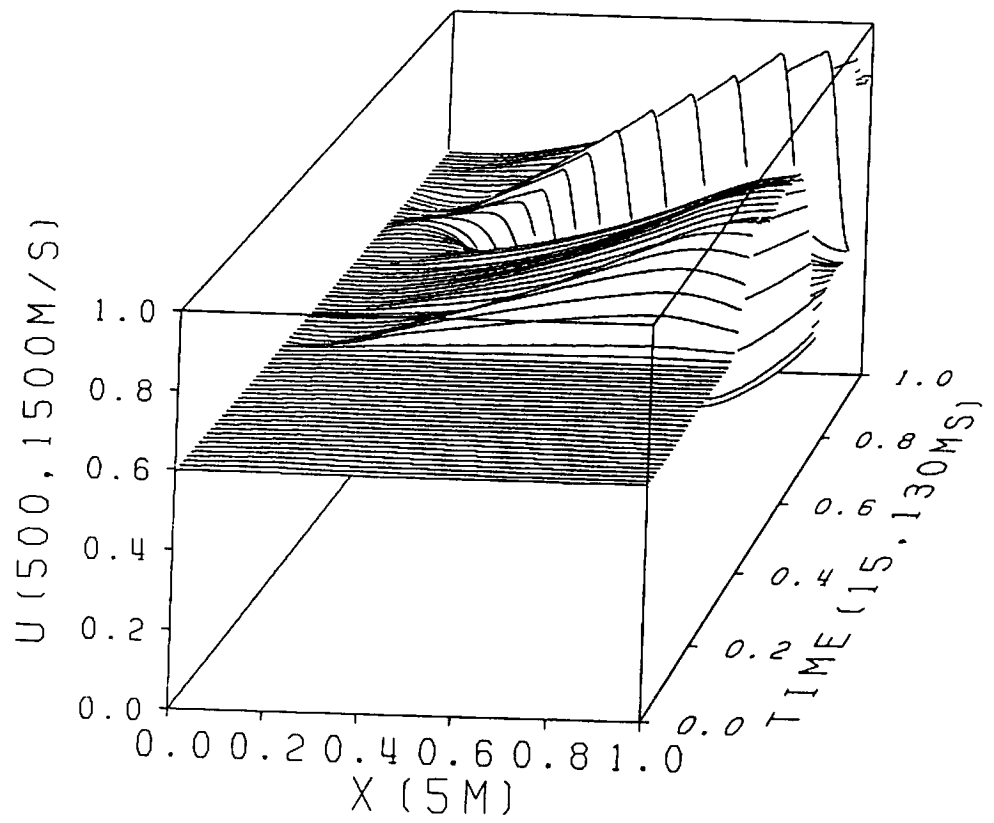


図2-5(2).10 転流失敗事故時の流速

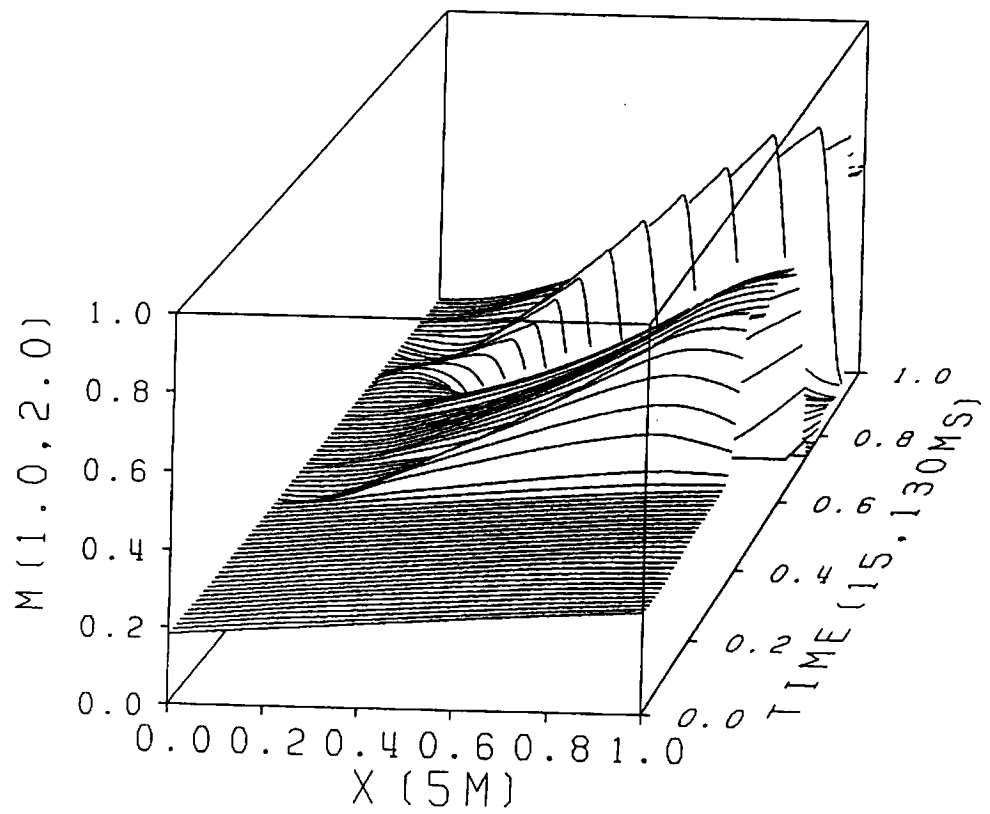


図2-5(2).11 転流失敗事故時のマッハ数

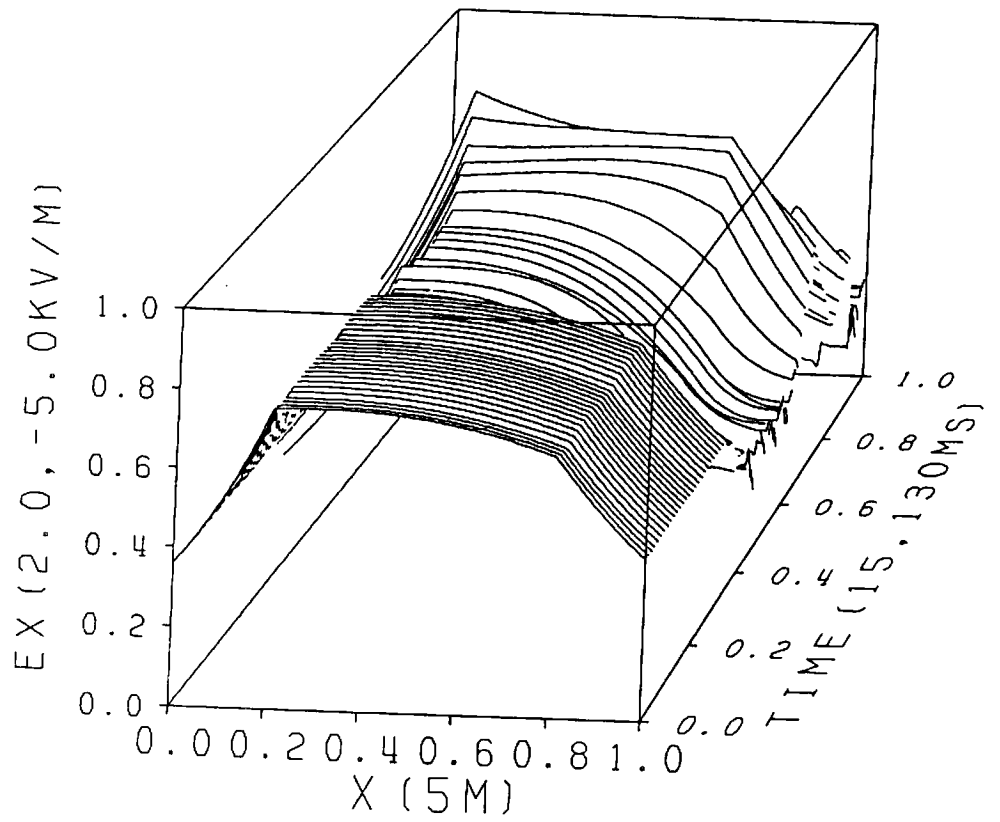


図2-5(2).12 転流失敗事故時の E_x

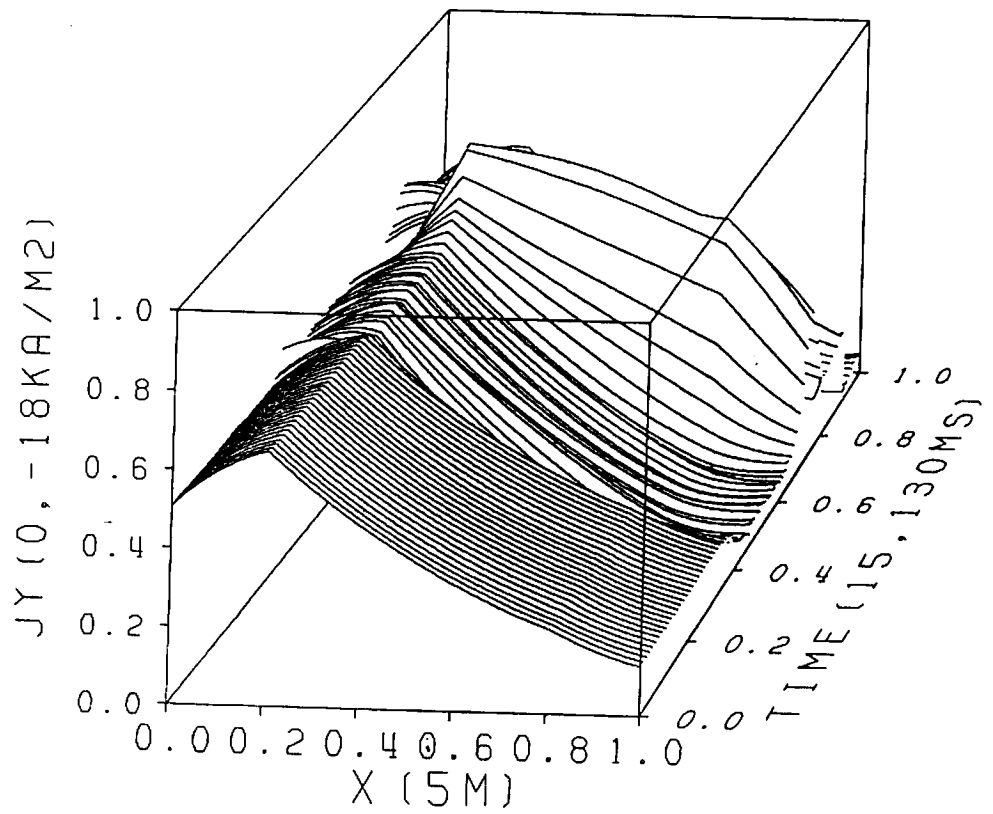


図2-5(2).13 転流失敗事故時の J_y

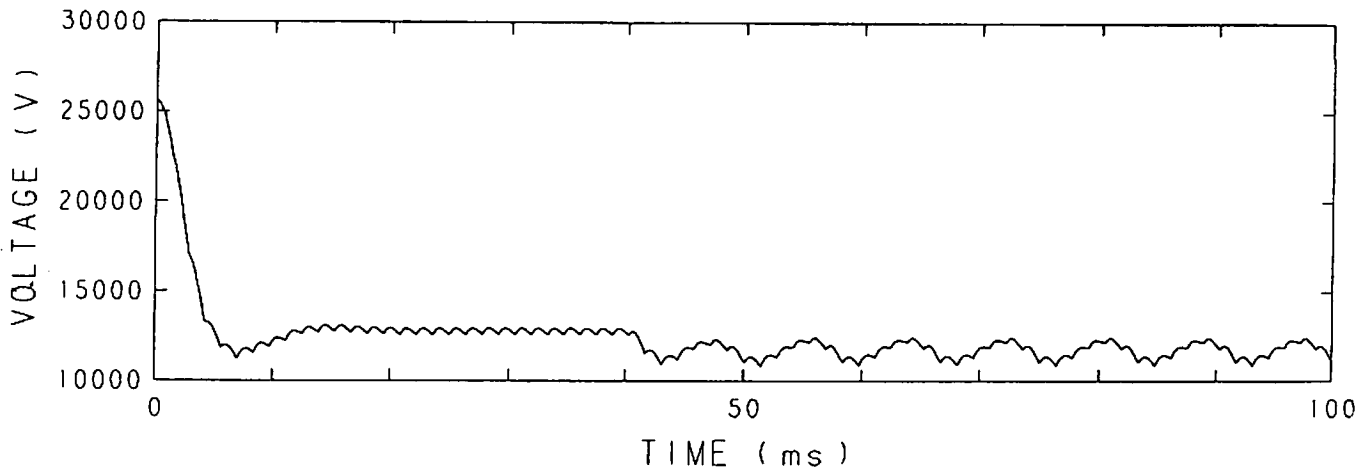


図2-5(3).1 1線地絡事故時のMHD発電機端子電圧

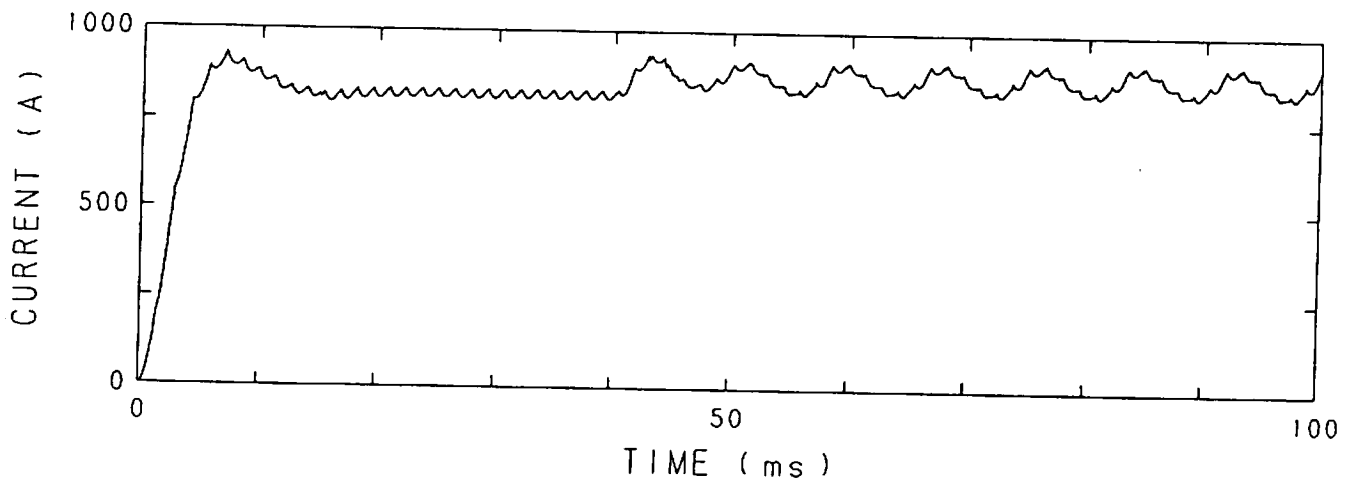


図2-5(3).2 1線地絡事故時のMHD発電機負荷電流

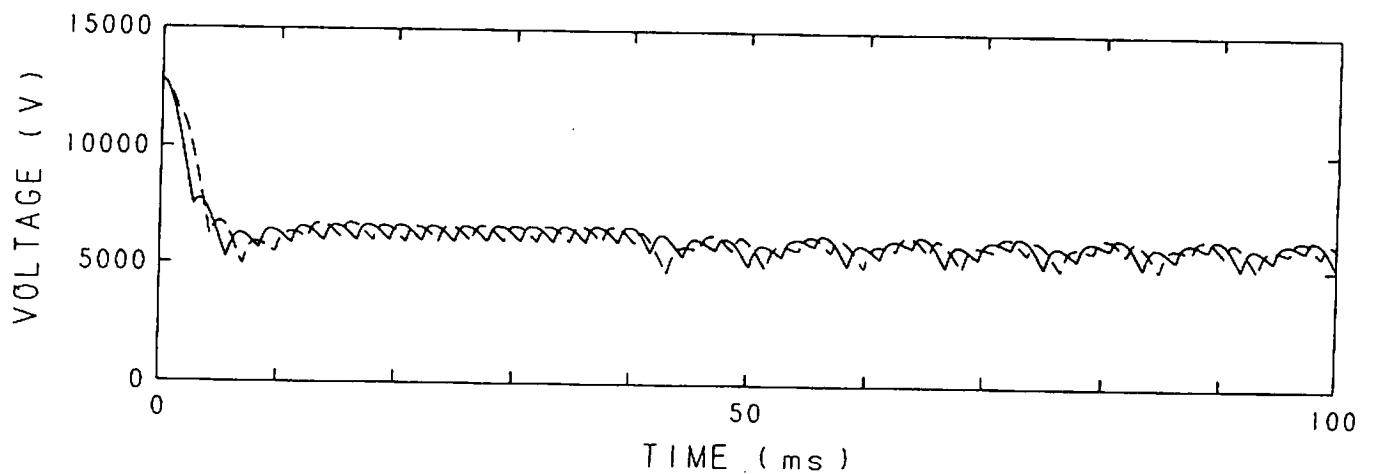


図2-5(3).3 1線地絡事故時の分圧コンデンサの電圧

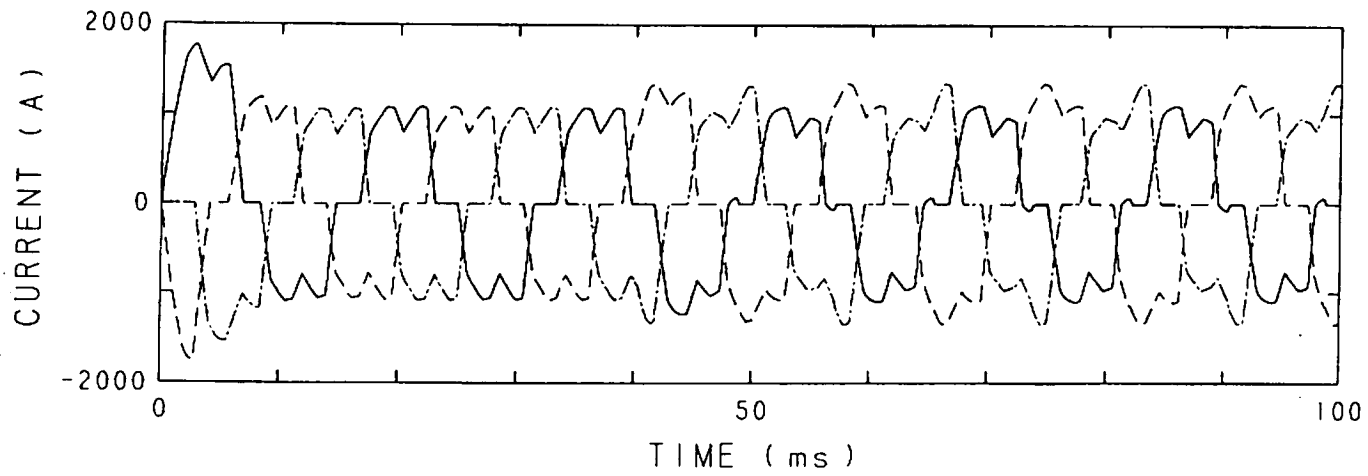


図2-5(3).4 1線地絡事故時の上側変圧器一次側電流

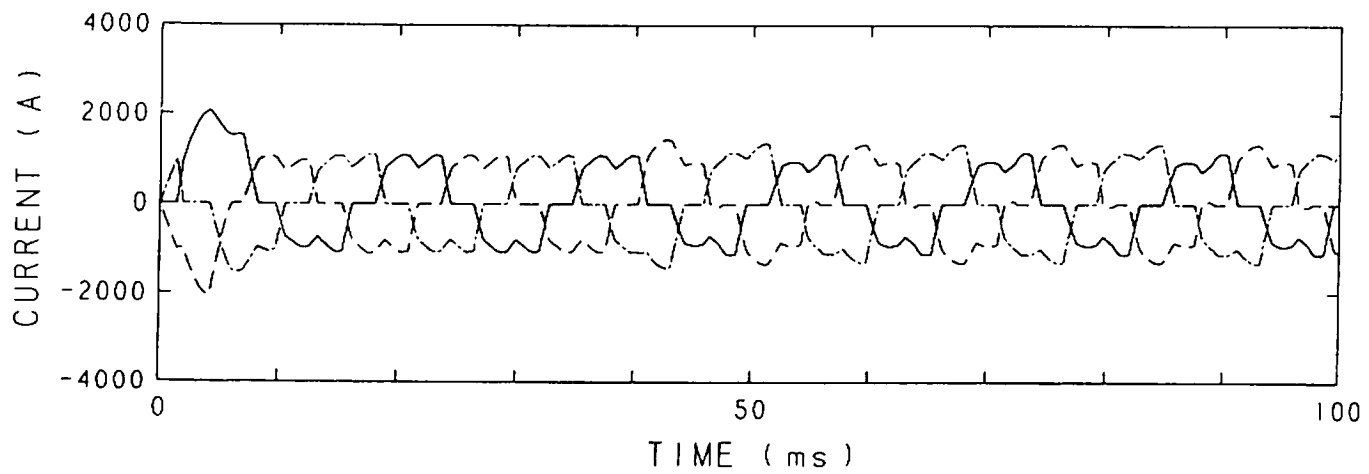


図2-5(3).5 1線地絡事故時の下側変圧器一次側電流

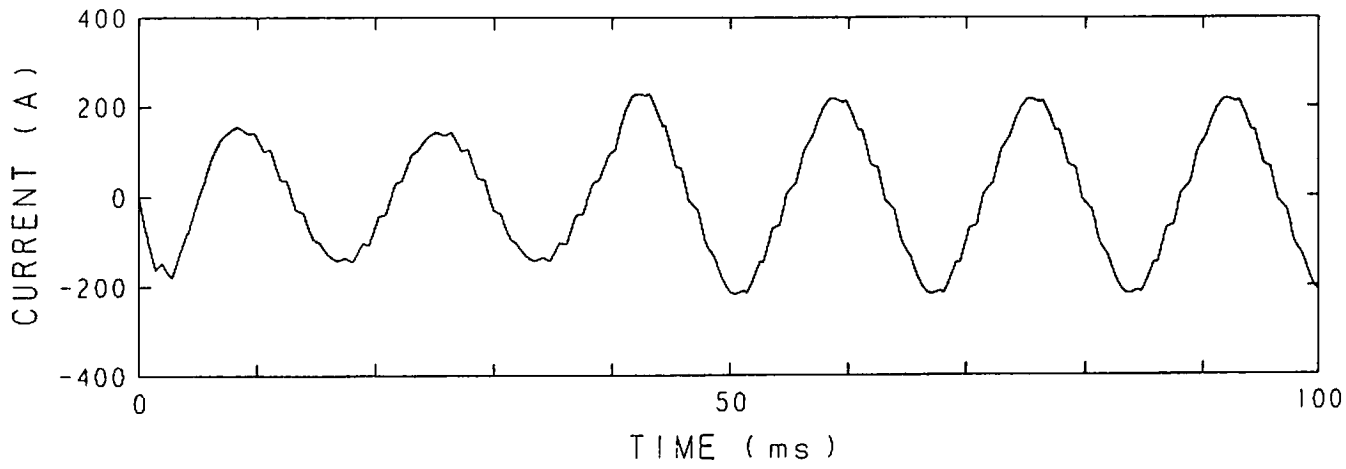


図2-5(3).6 1線地絡事故時の送電線電流(事故地点よりインバータ側、c相)

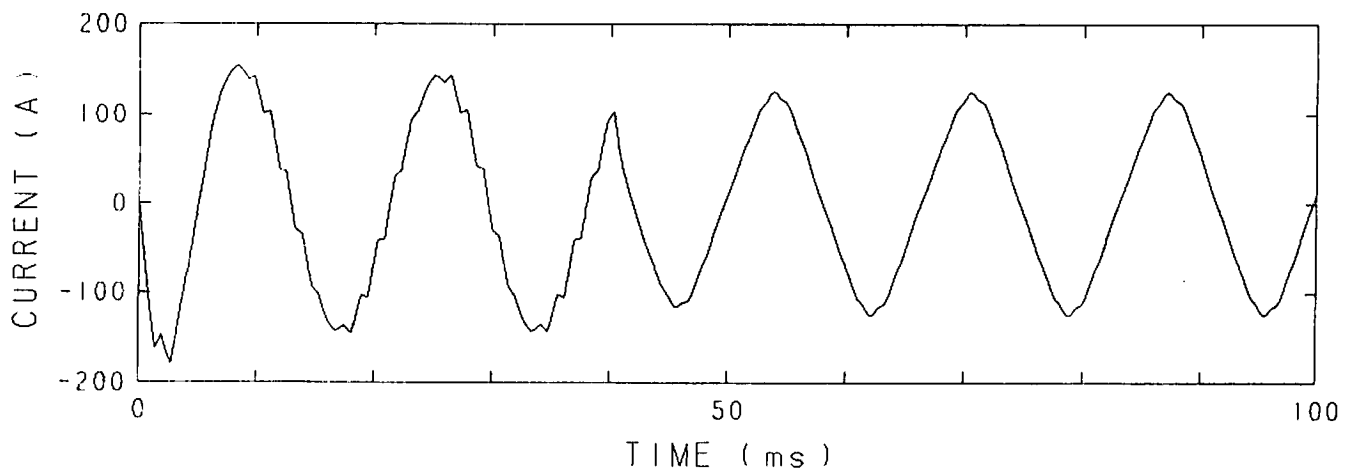


図2-5(3).7 1線地絡事故時の送電線電流(事故地点より無限大母線側、c相)

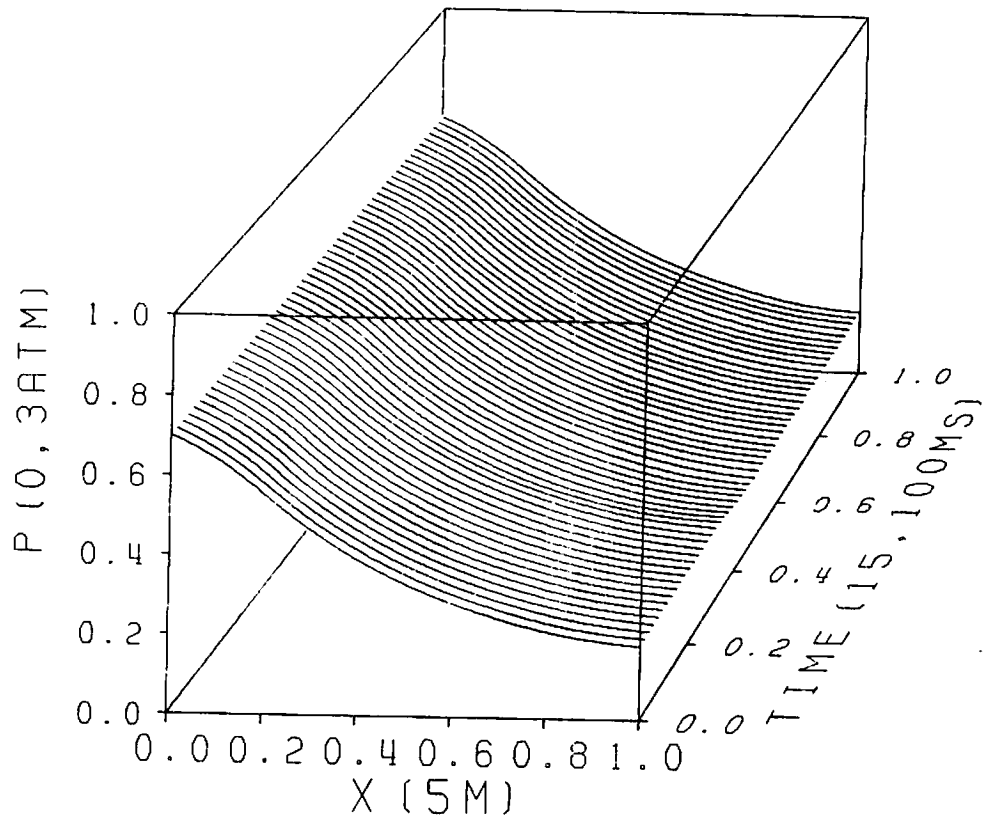


図2-5(3).8 1線地絡事故時の流体の圧力

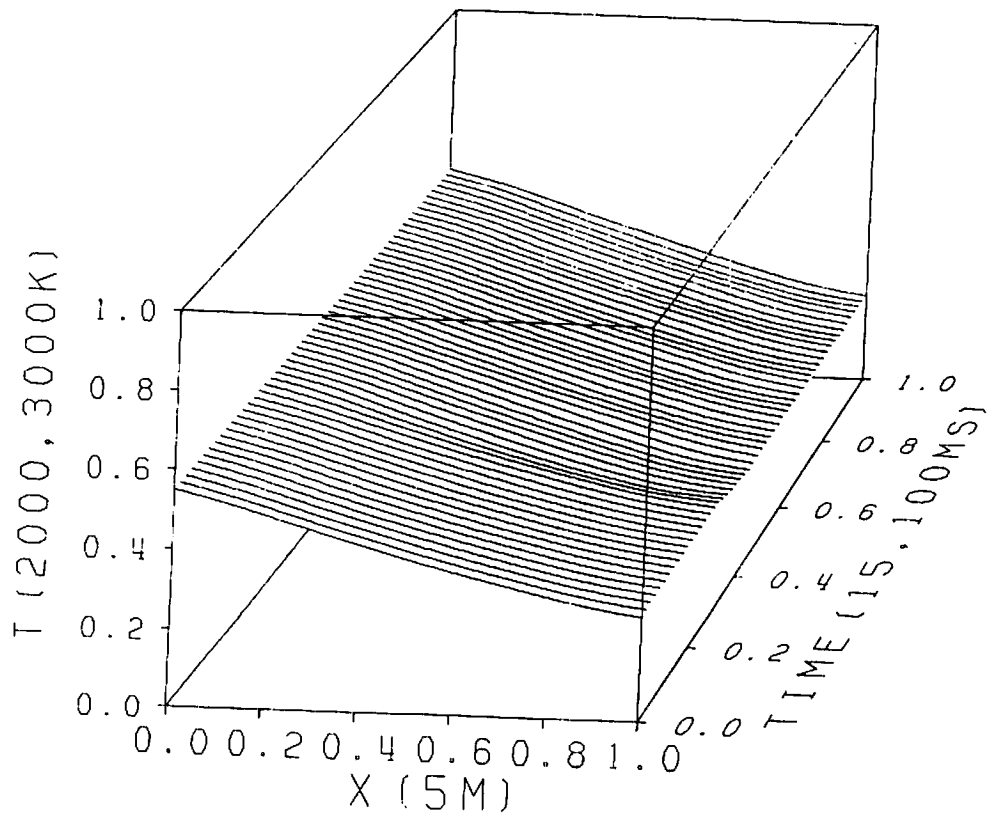


図2-5(3).9 1線地絡事故時の流体の温度

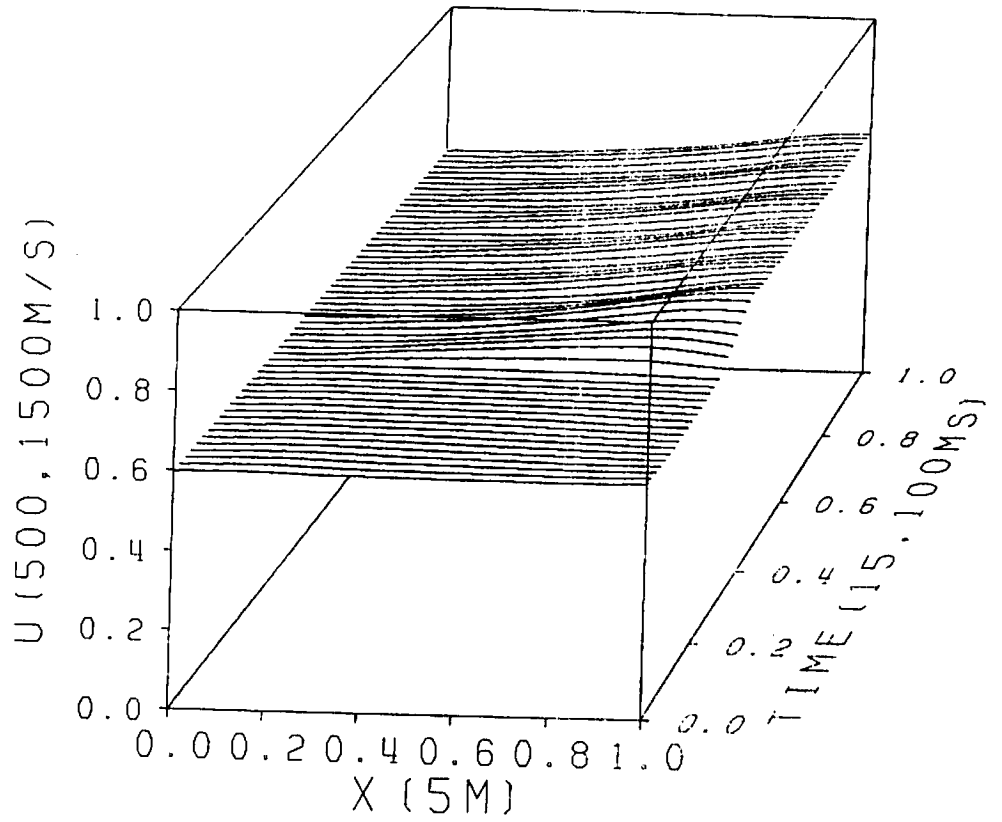


図2-5(3).10 1線地絡事故時の流速

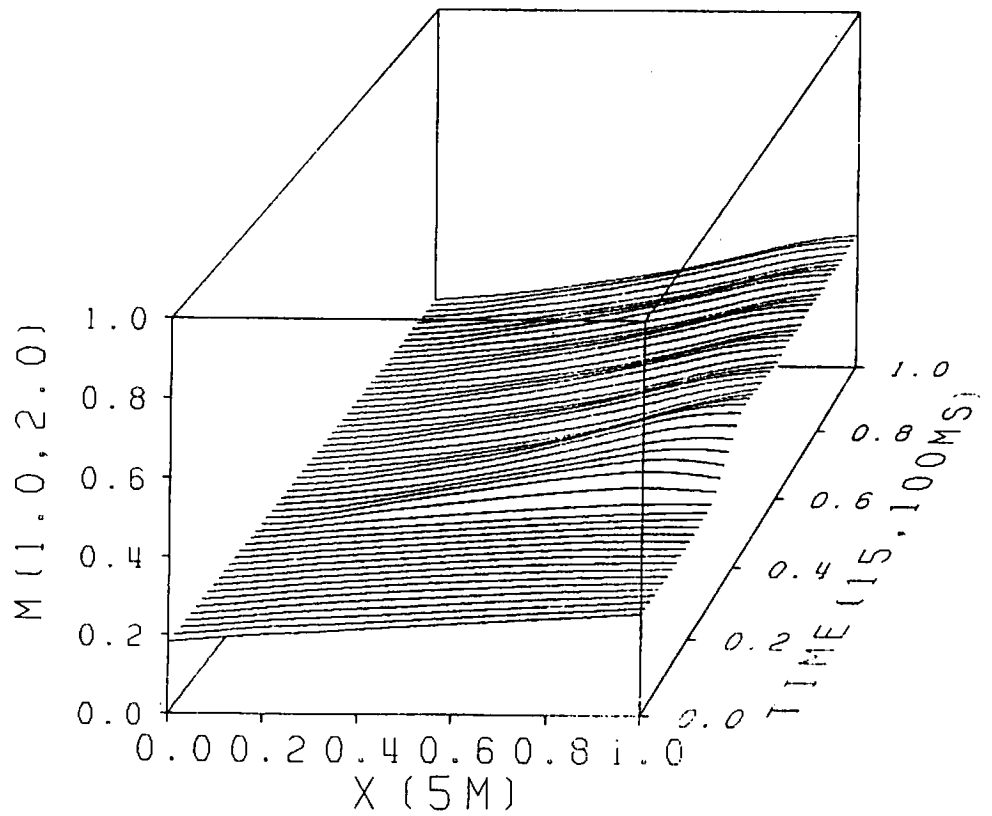


図2-5(3).11 1線地絡事故時のマッハ数

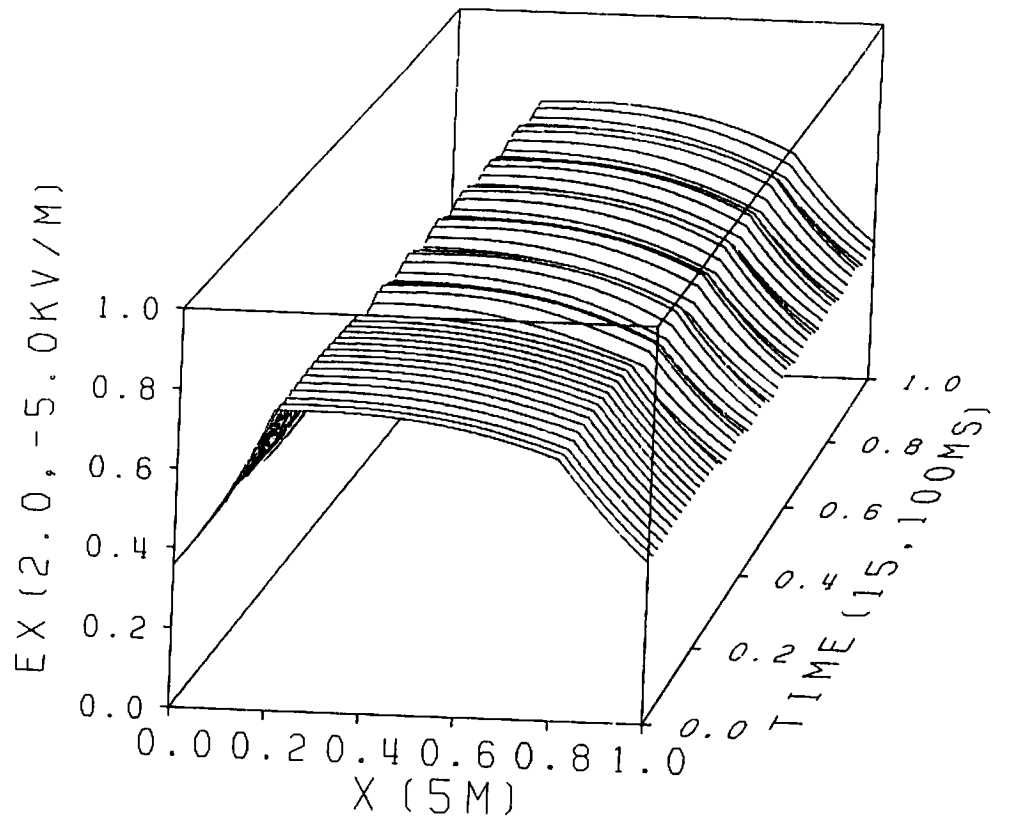


図2-5(3).12 1線地絡事故時の E_x

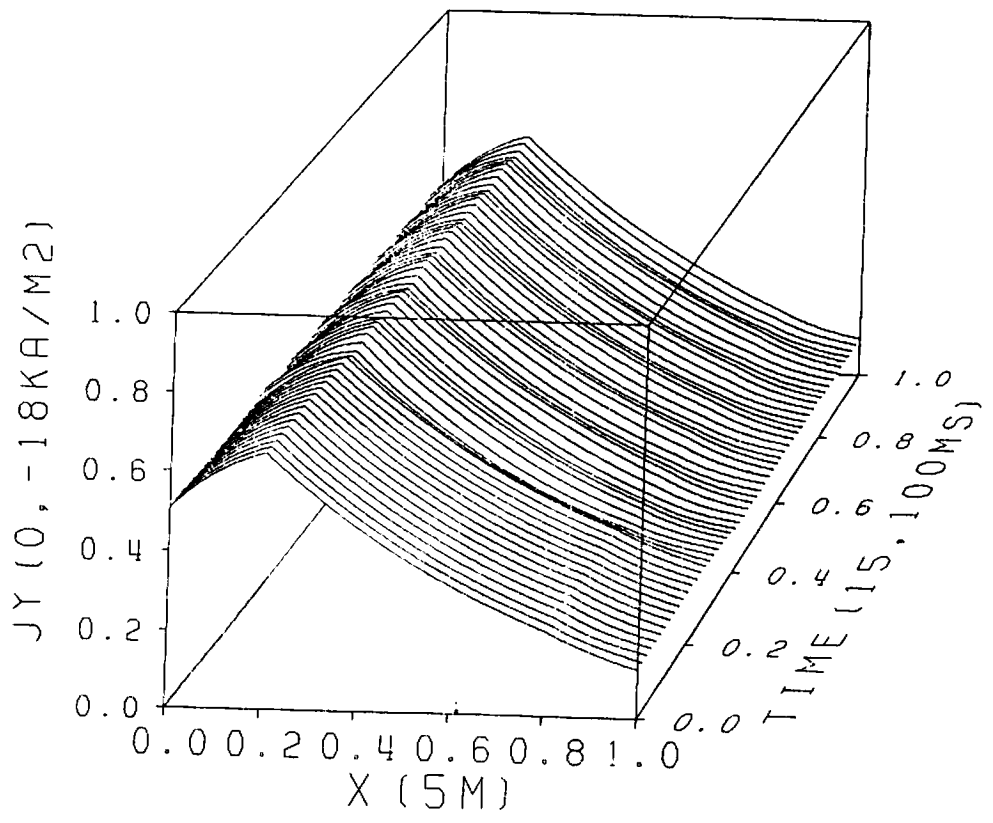


図2-5(3).13 1線地絡事故時の J_y

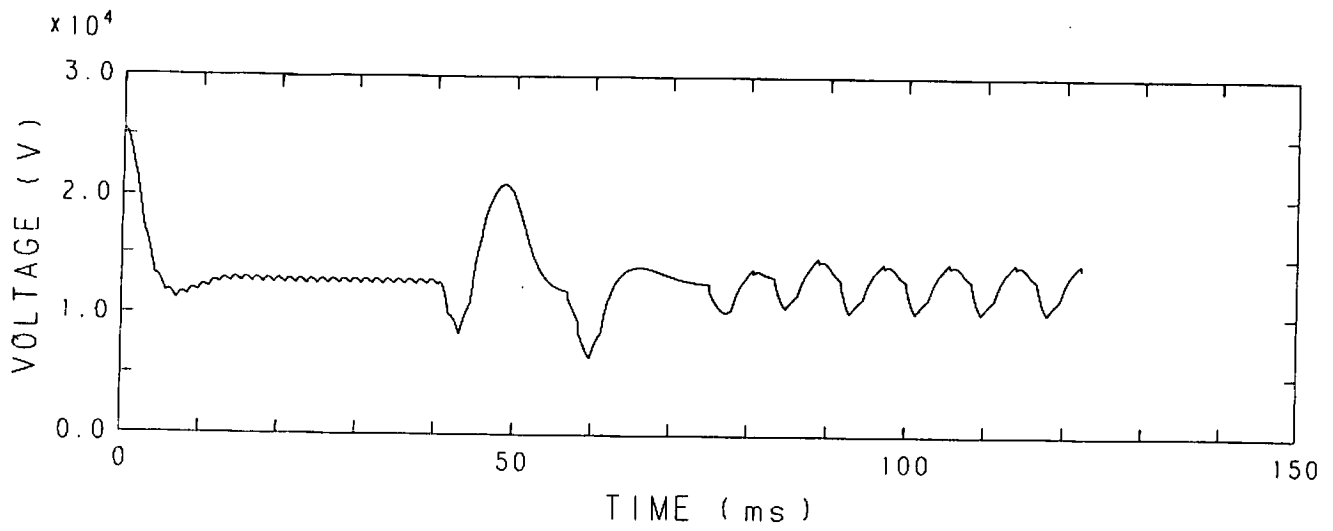


図2-5(4).1 2線短絡事故時のMHD発電機端子電圧

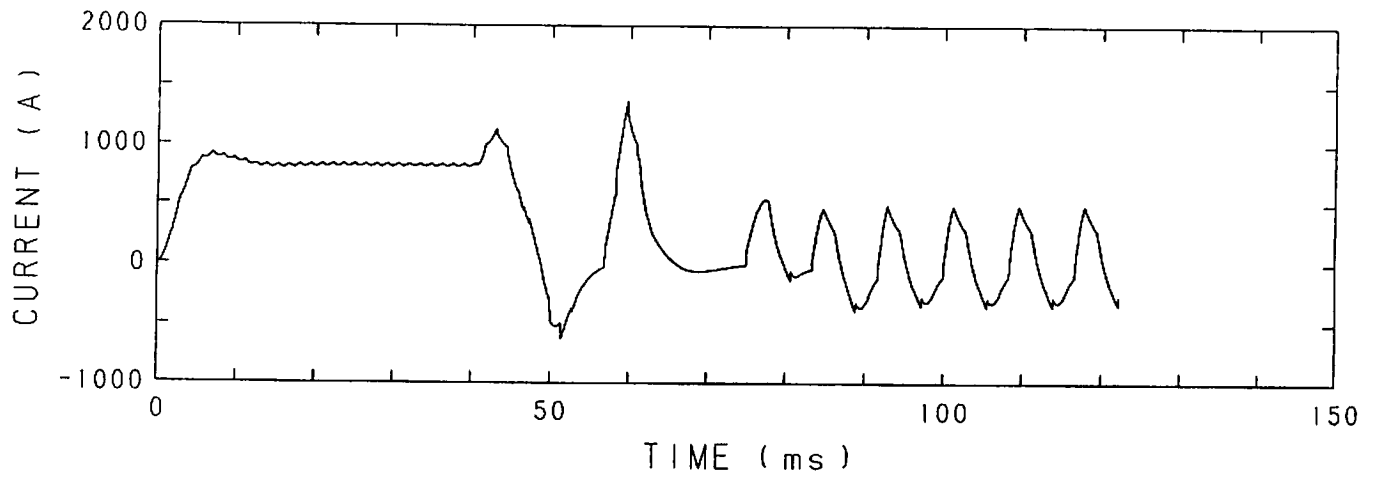


図2-5(4).2 2線短絡事故時のMHD発電機負荷電流

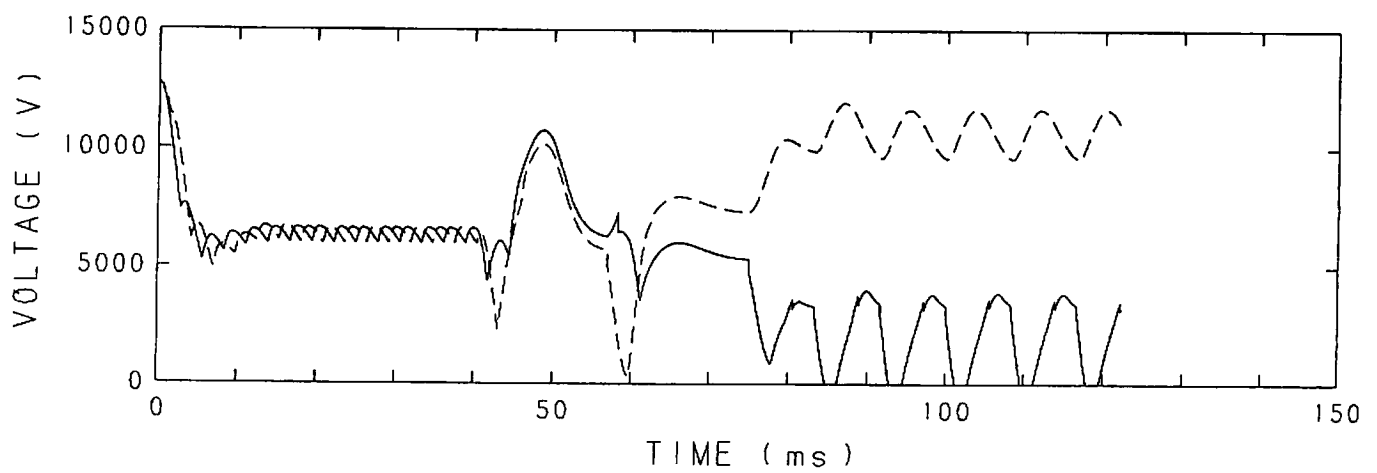


図2-5(4).3 2線短絡事故時の分圧コンデンサの電圧

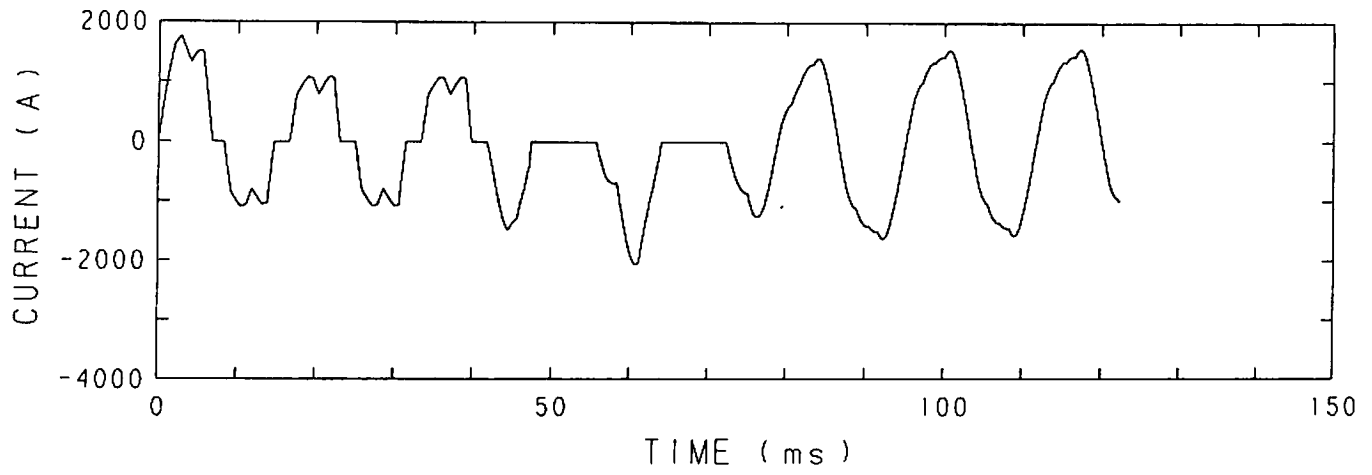


図2-5(4).4 2線短絡事故時の上側変圧器一次側電流

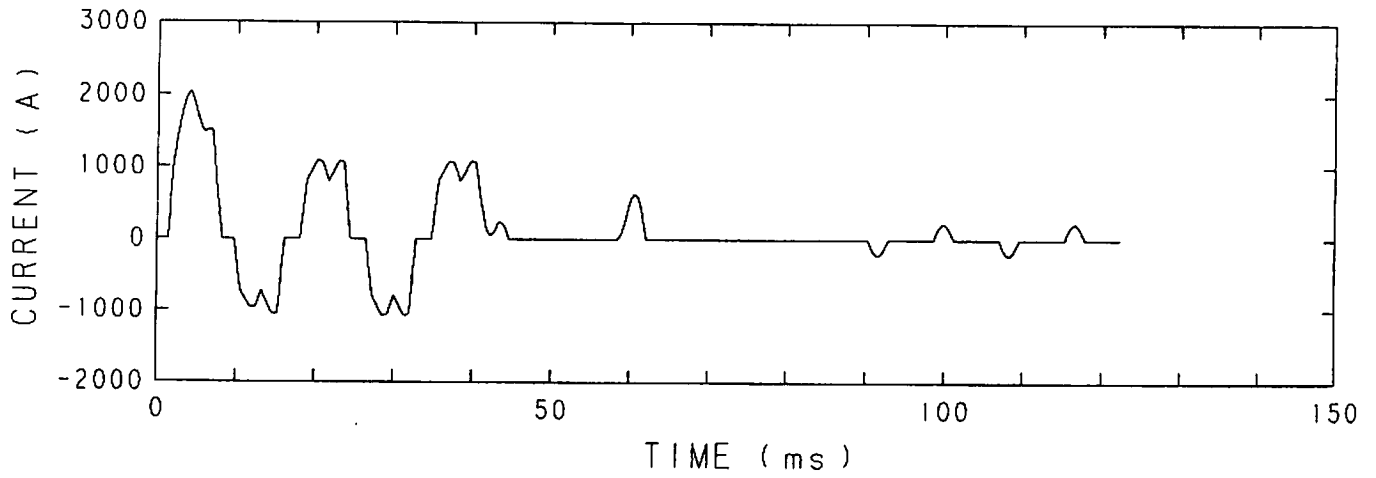


図2-5(4).5 2線短絡事故時の下側変圧器一次側電流

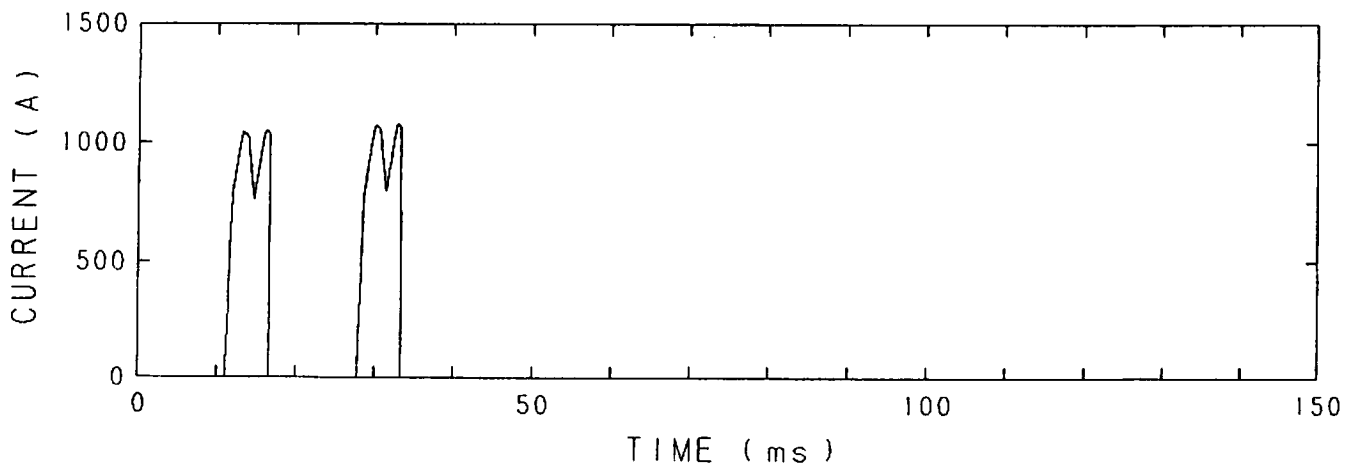


図2-5(4).6 2線短絡事故時のメインサイリスタ(M₅)の電流波形

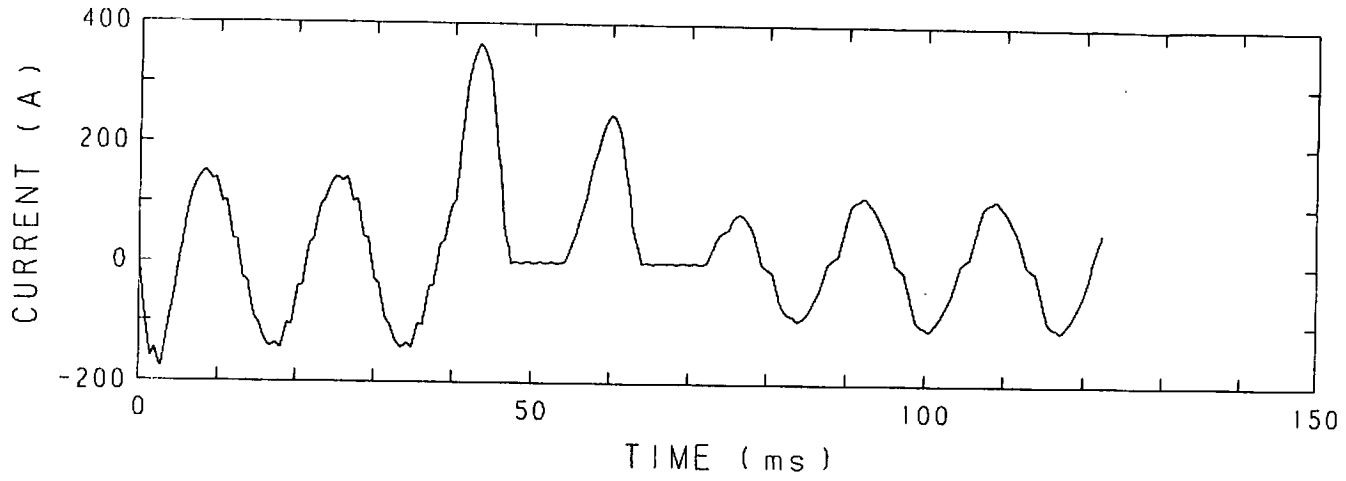


図2-5(4).7 2線短絡事故時の送電線電流(事故地点よりインバータ側、c相)

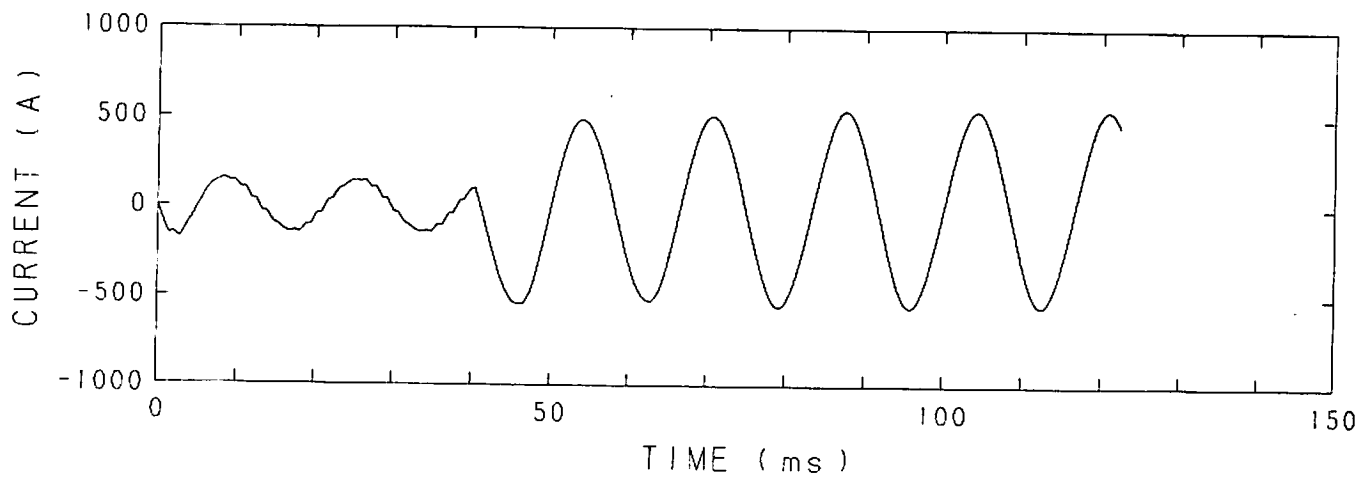


図2-5(4).8 2線短絡事故時の送電線電流(事故地点より無限大母線側、c相)

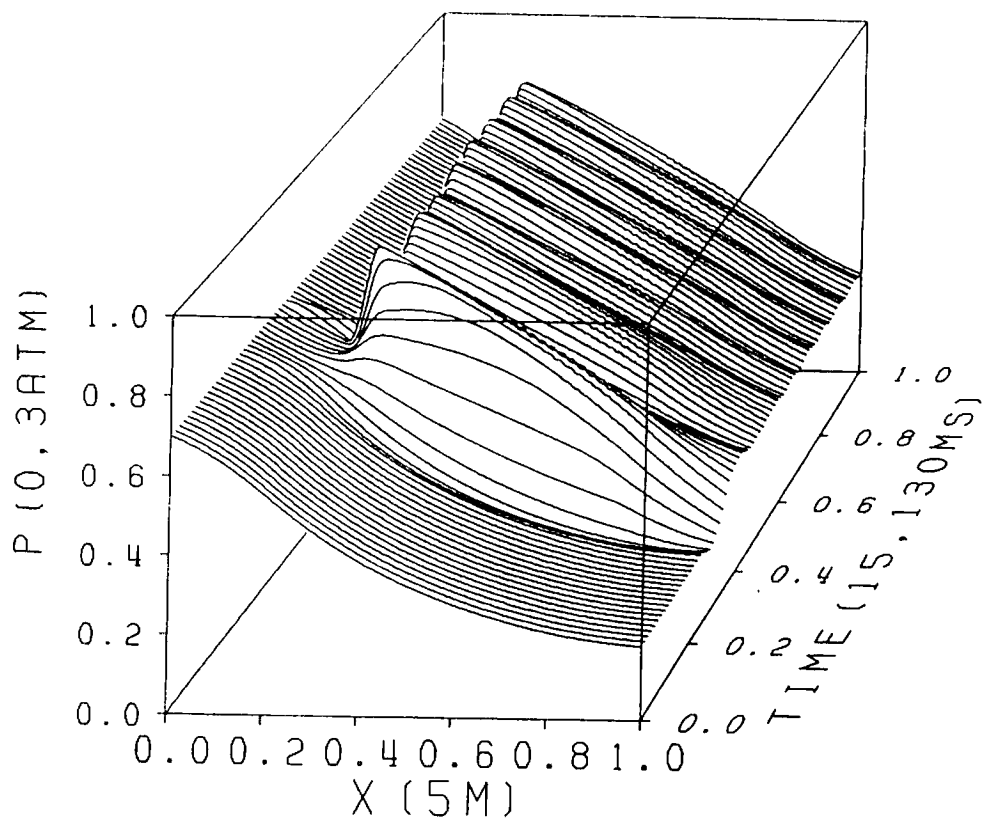


図2-5(4).9 2線短絡事故時の流体の圧力

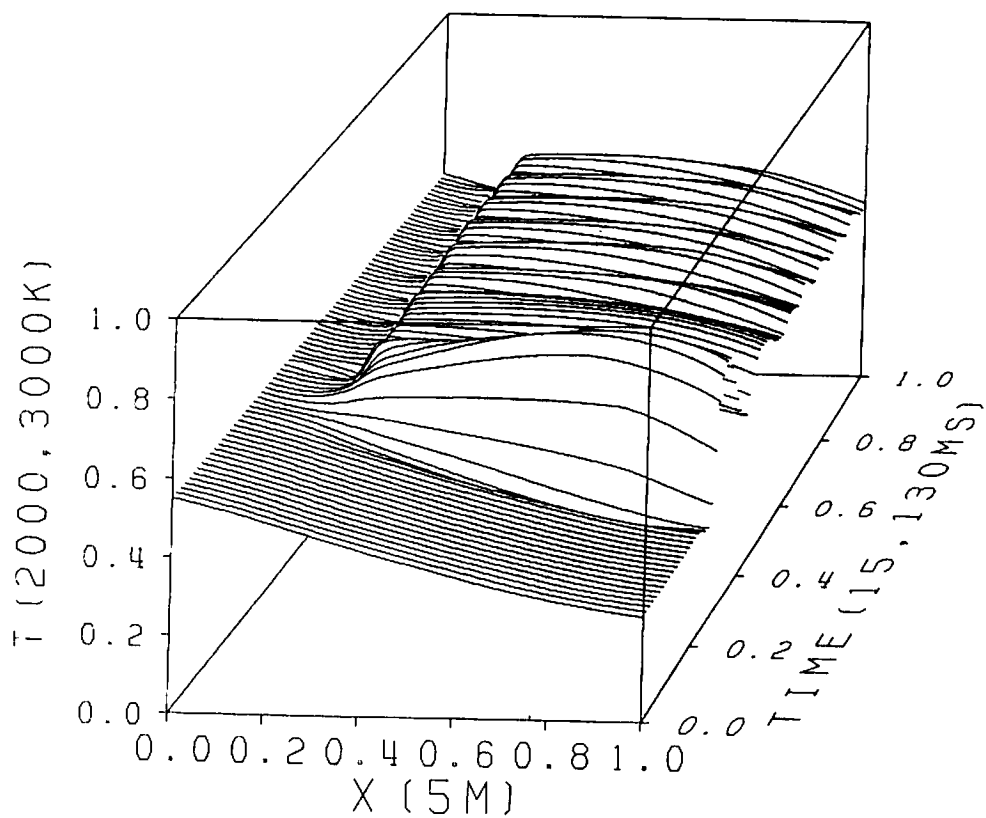


図2-5(4).10 2線短絡事故時の流体の温度

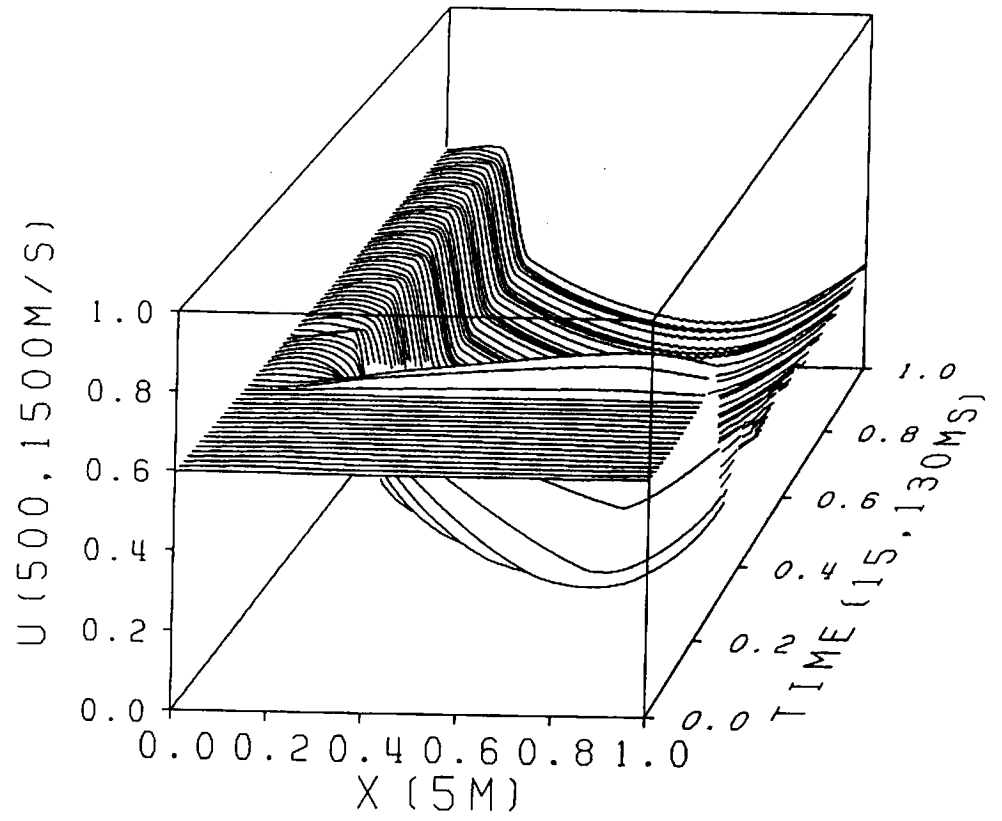


図2-5(4).11 2線短絡事故時の流速

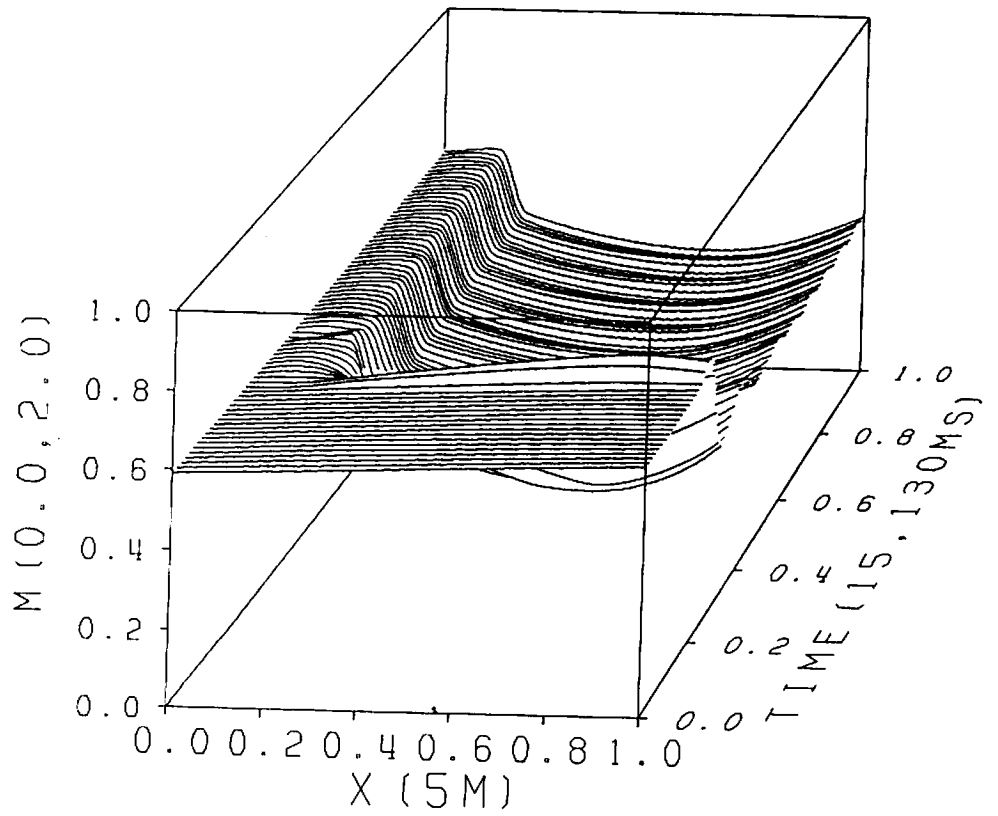


図2-5(4).12 2線短絡事故時のマッハ数

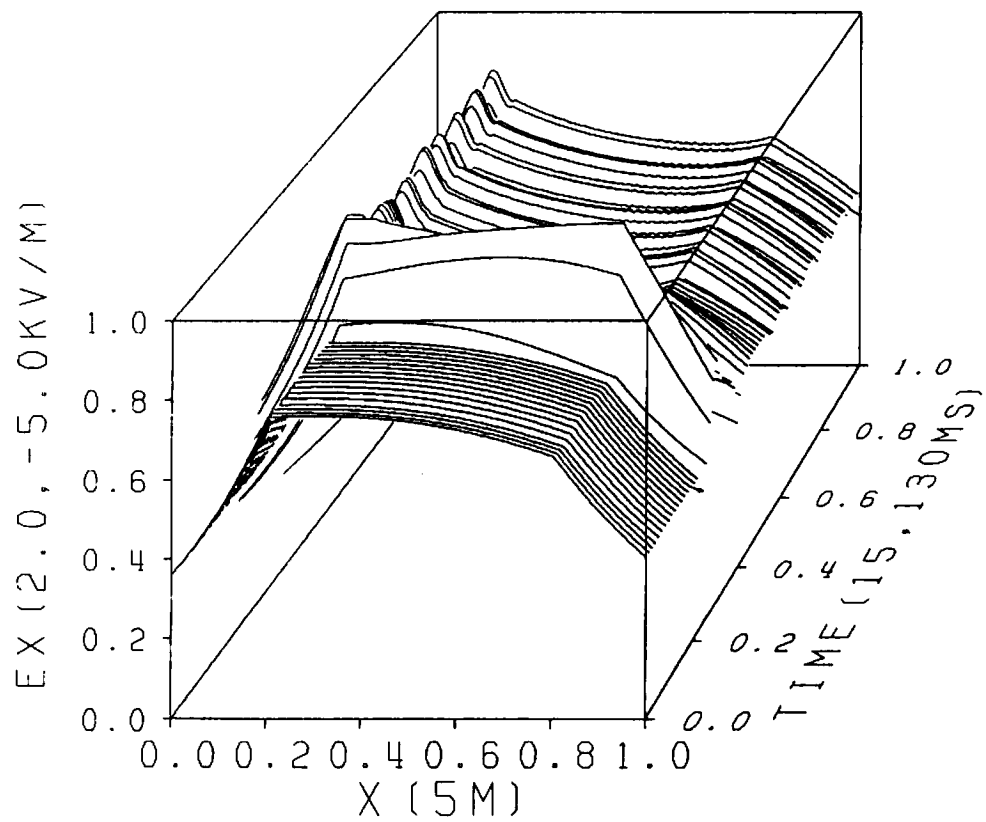


図2-5(4).13 2線短絡事故時の E_x

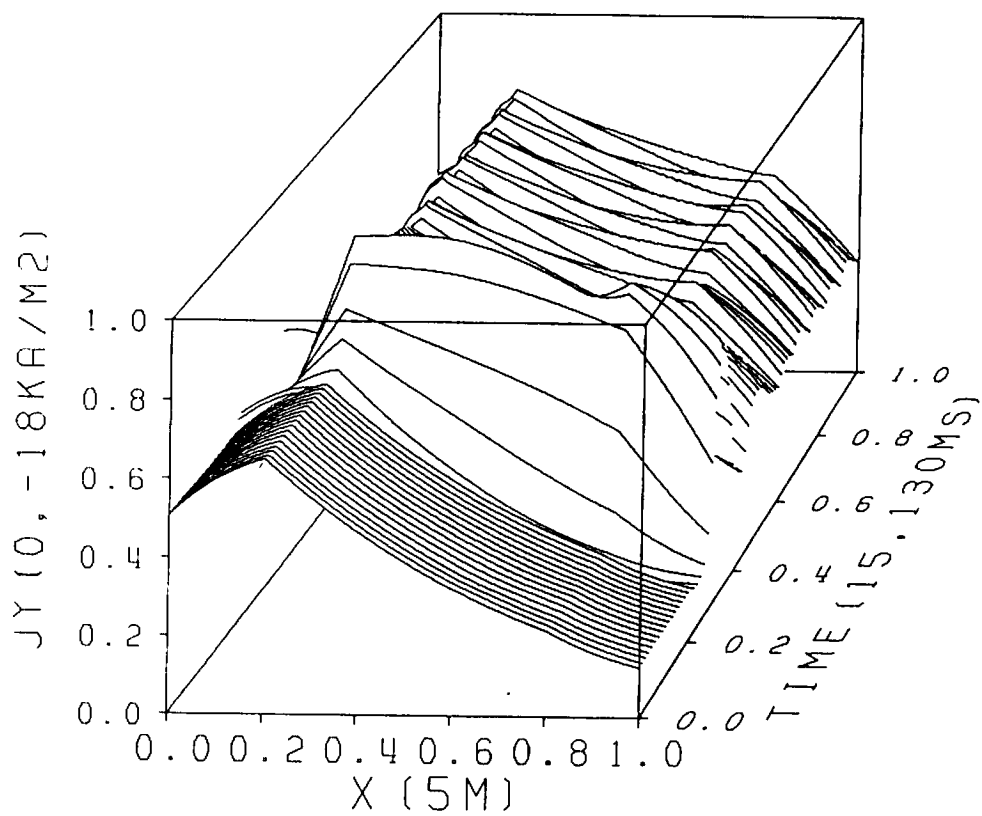


図2-5(4).14 2線短絡事故時の J_y

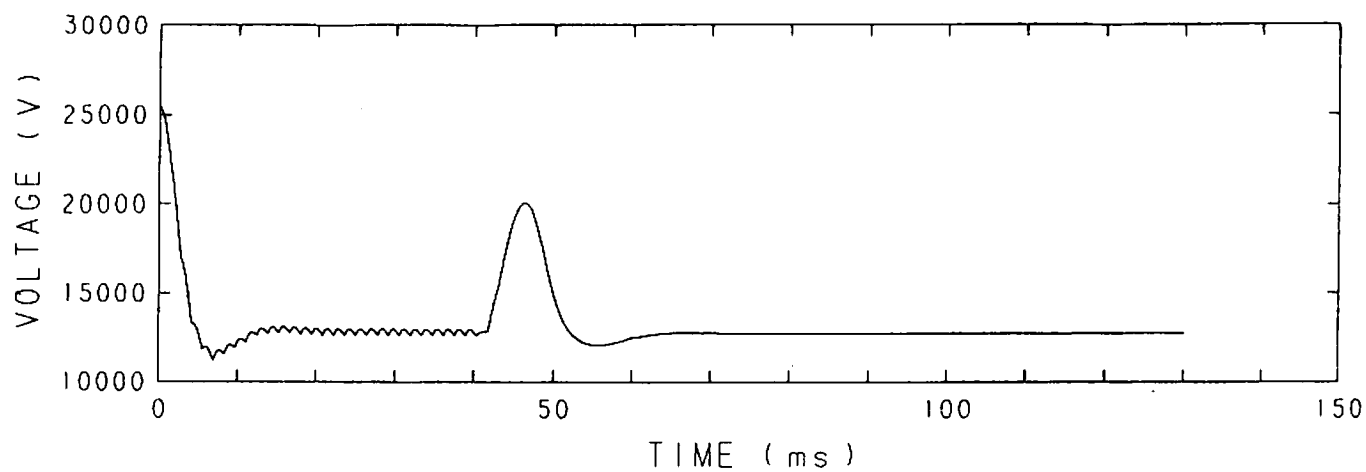


図2-5(5).1 1線断線事故時のMHD発電機端子電圧

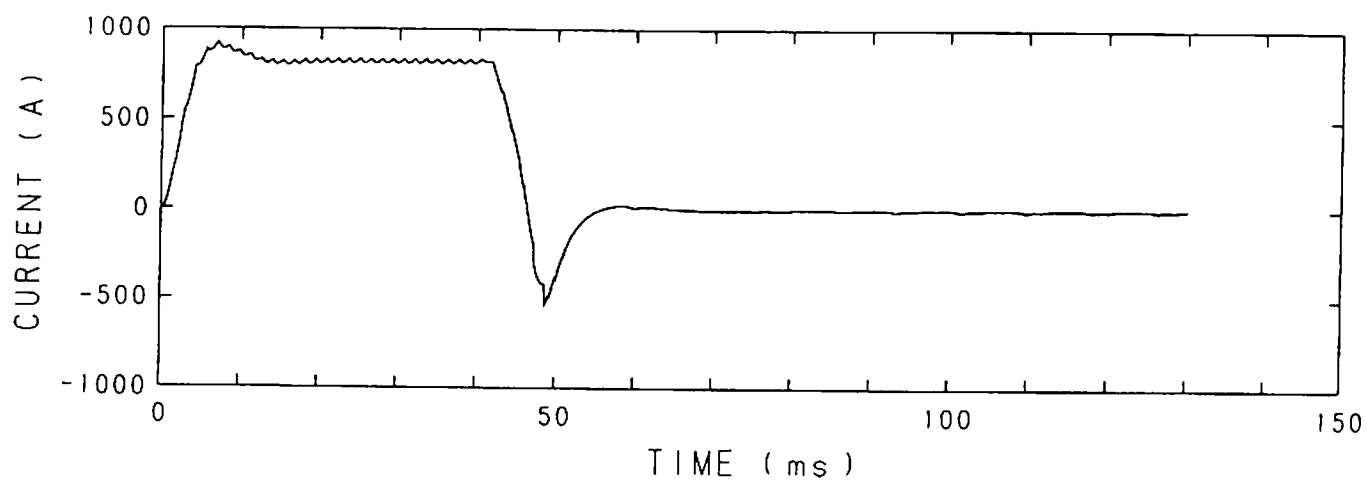


図2-5(5).2 1線断線事故時のMHD発電機負荷電流

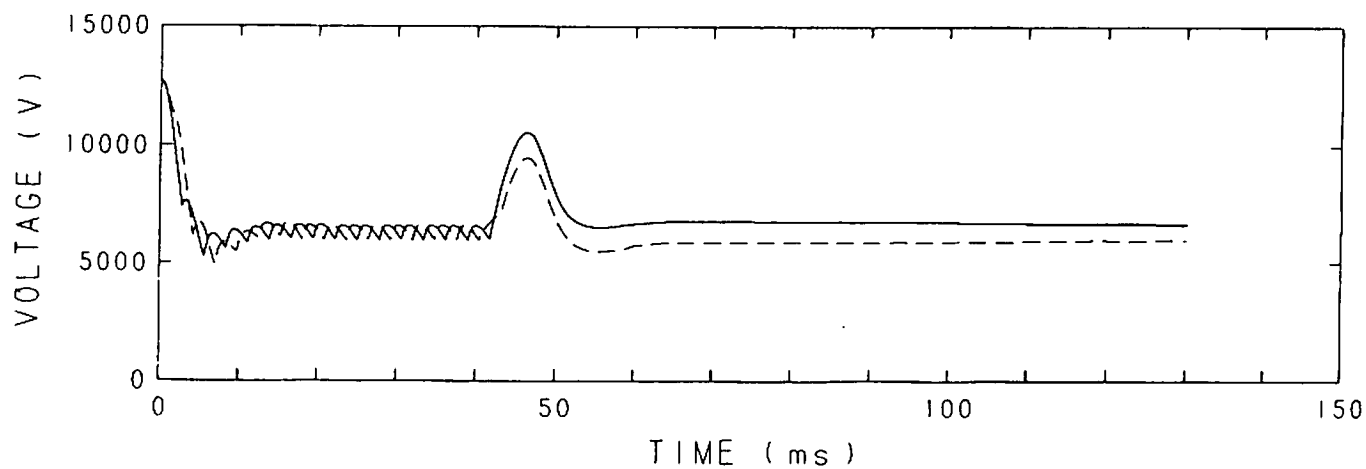


図2-5(5).3 1線断線事故時の分圧コンデンサの電圧

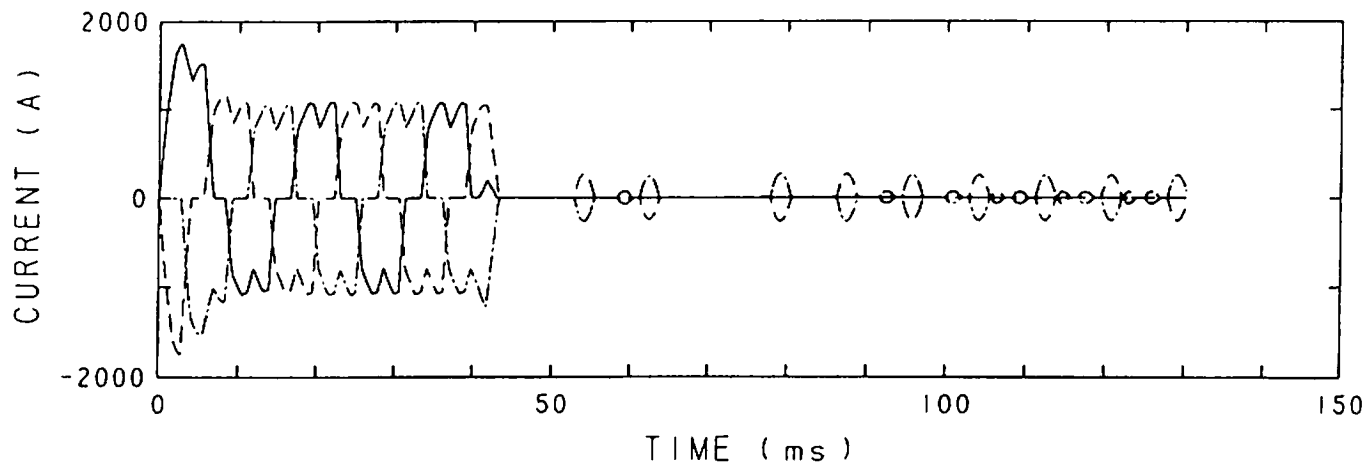


図2-5(5).4 1線断線事故時の上側変圧器一次側電流

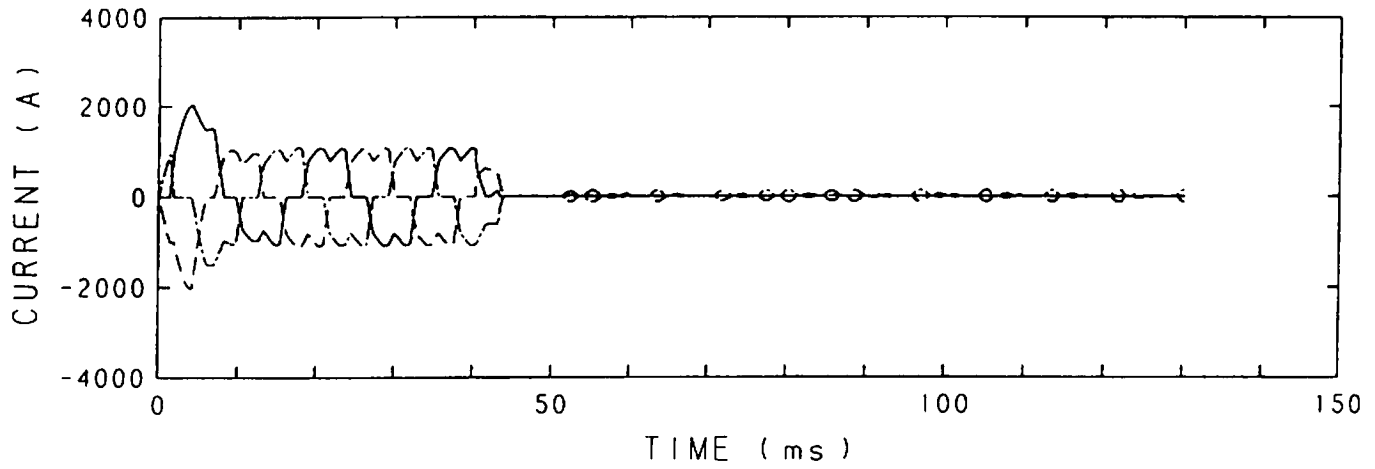


図2-5(5).5 1線断線事故時の下側変圧器一次側電流

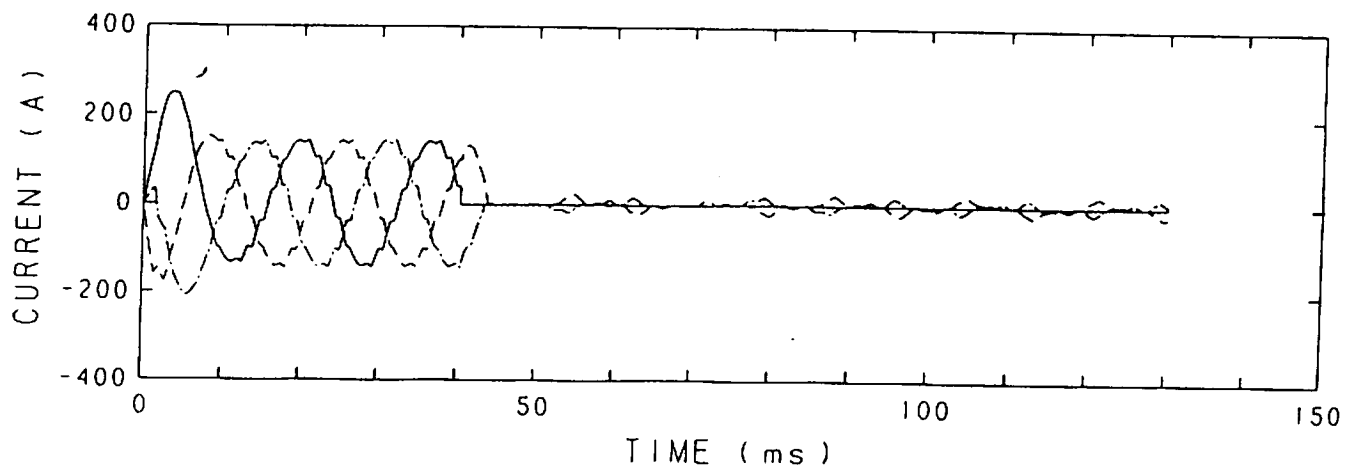


図2-5(5).6 1線断線事故時の送電線電流

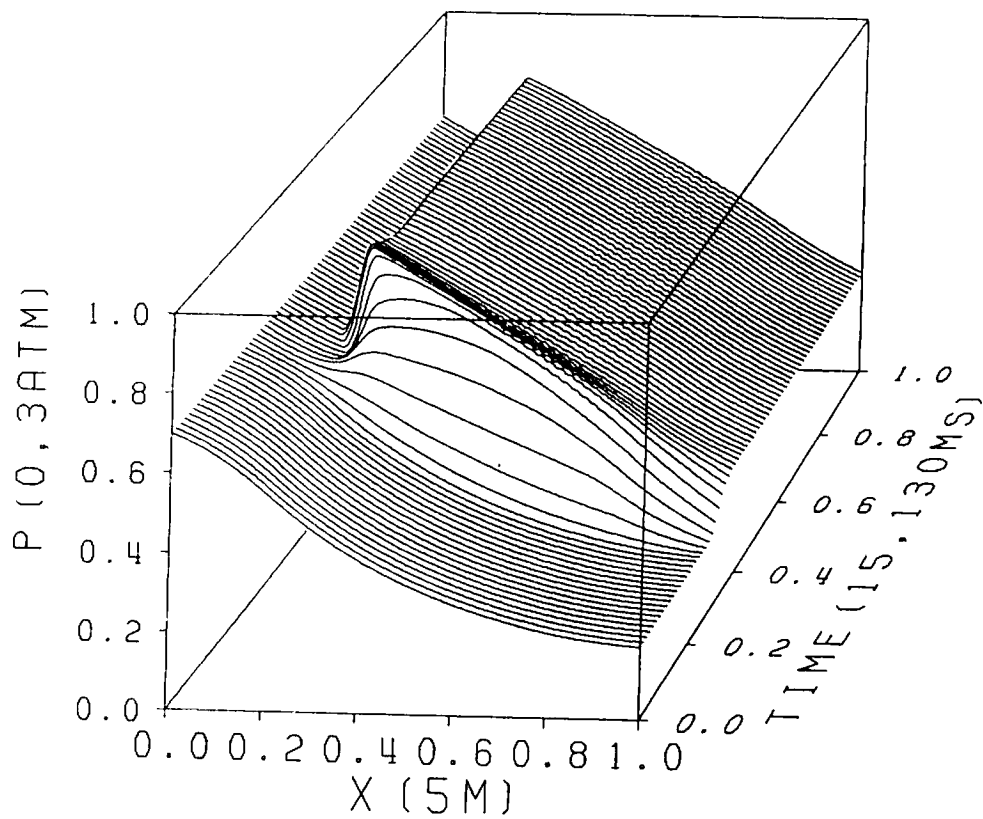


図2-5(5).7 1線断線事故時の流体の圧力

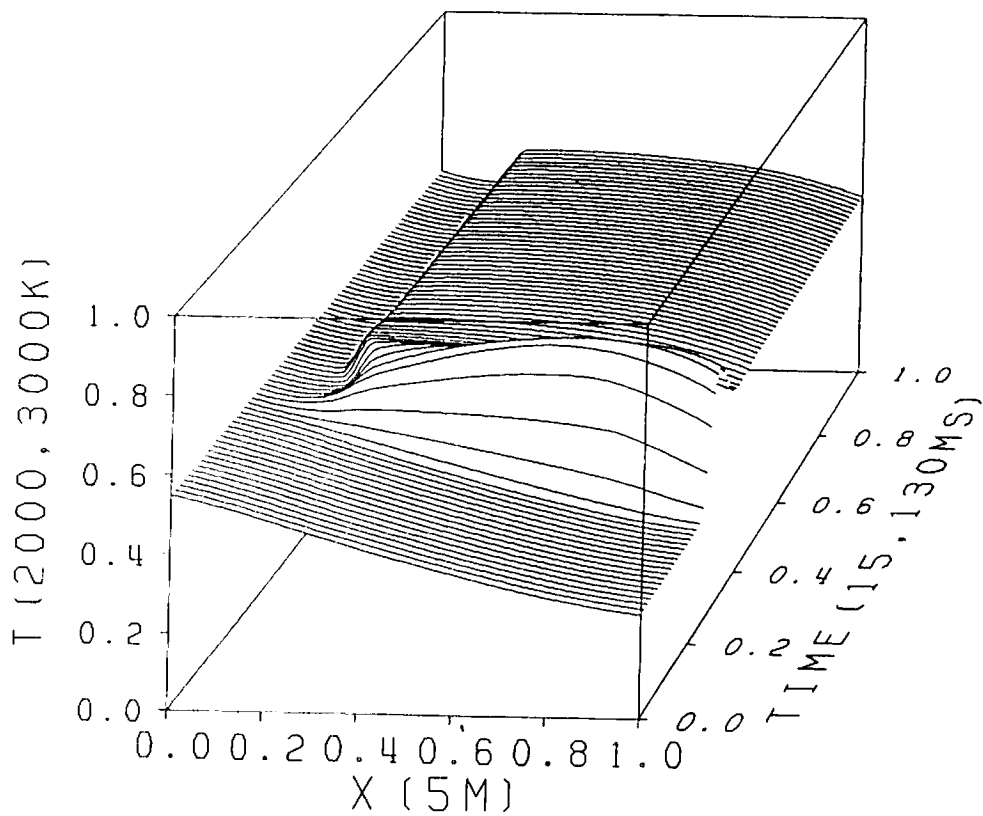


図2-5(5).8 1線断線事故時の流体の温度

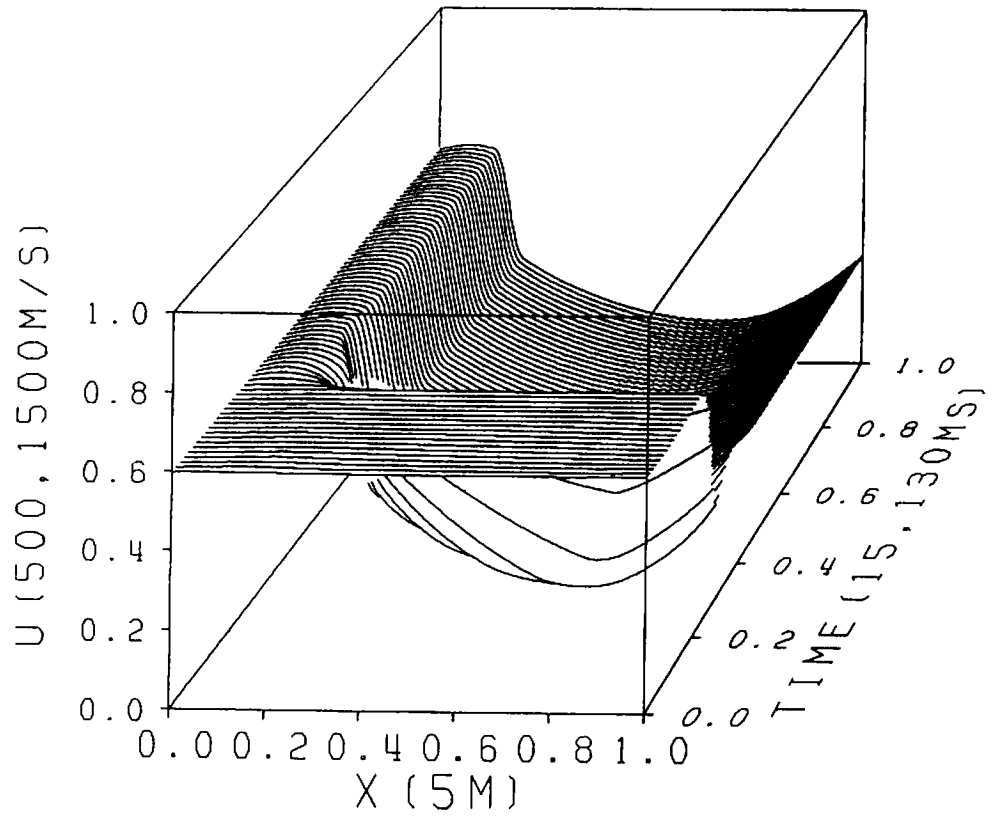


図2-5(5).9 1線断線事故時の流速

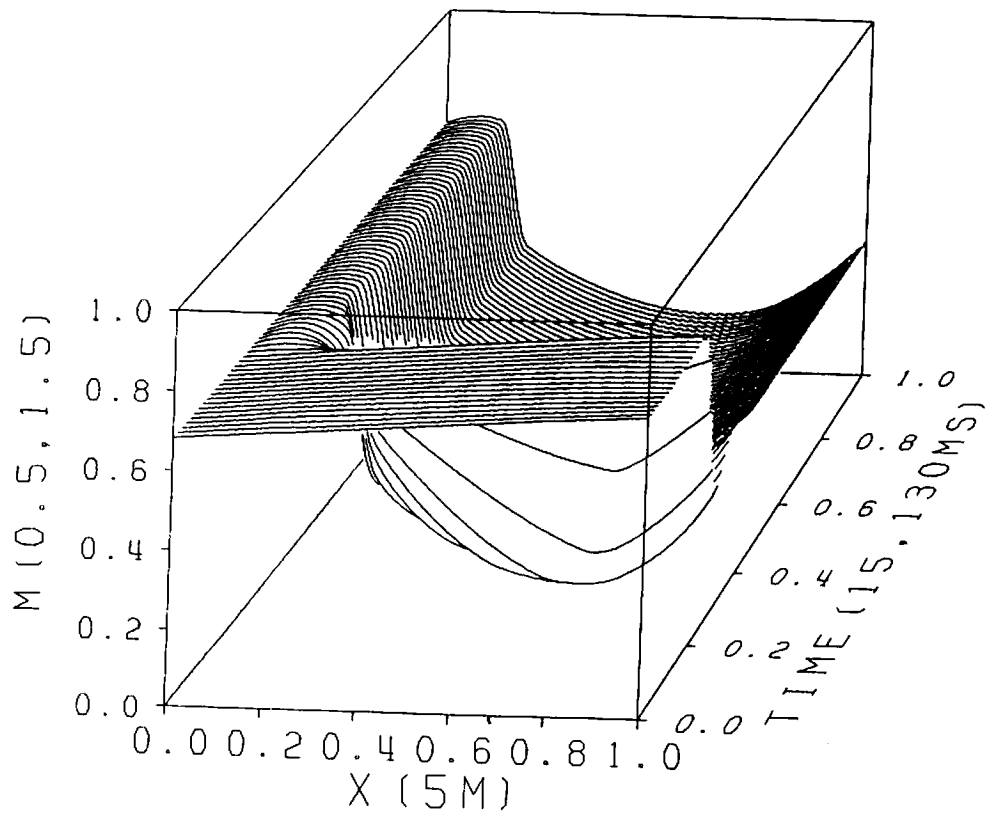


図2-5(5).10 1線断線事故時のマッハ数

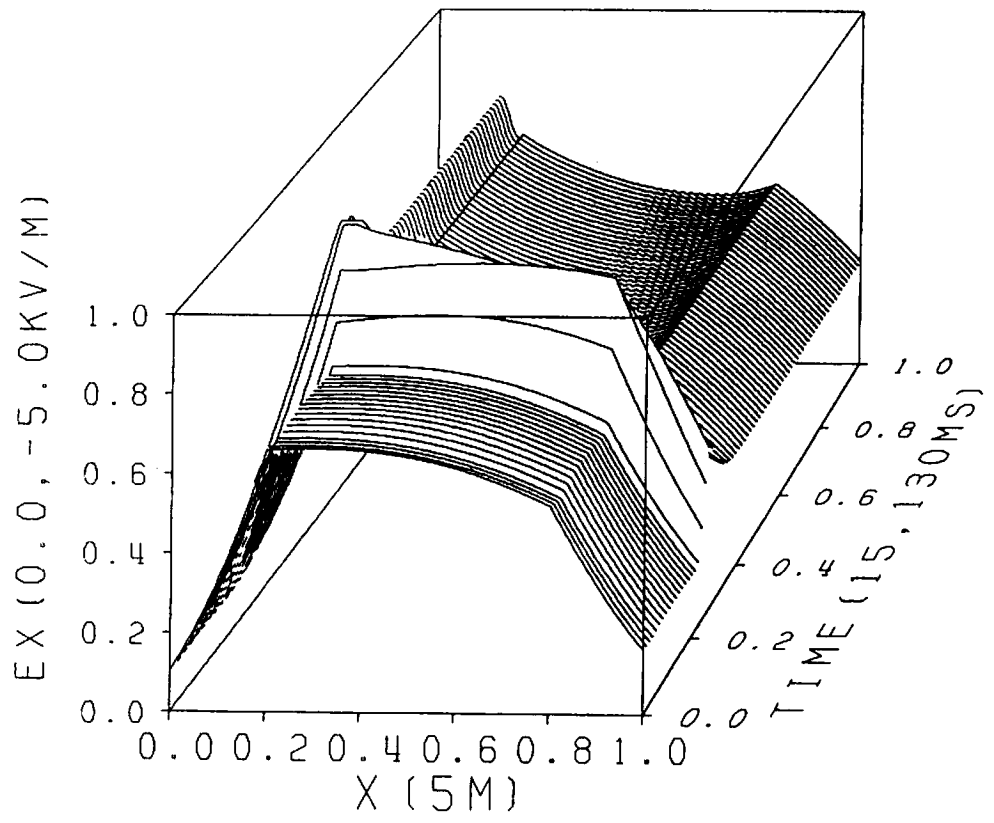


図2-5(5).11 1線断線事故時の E_x

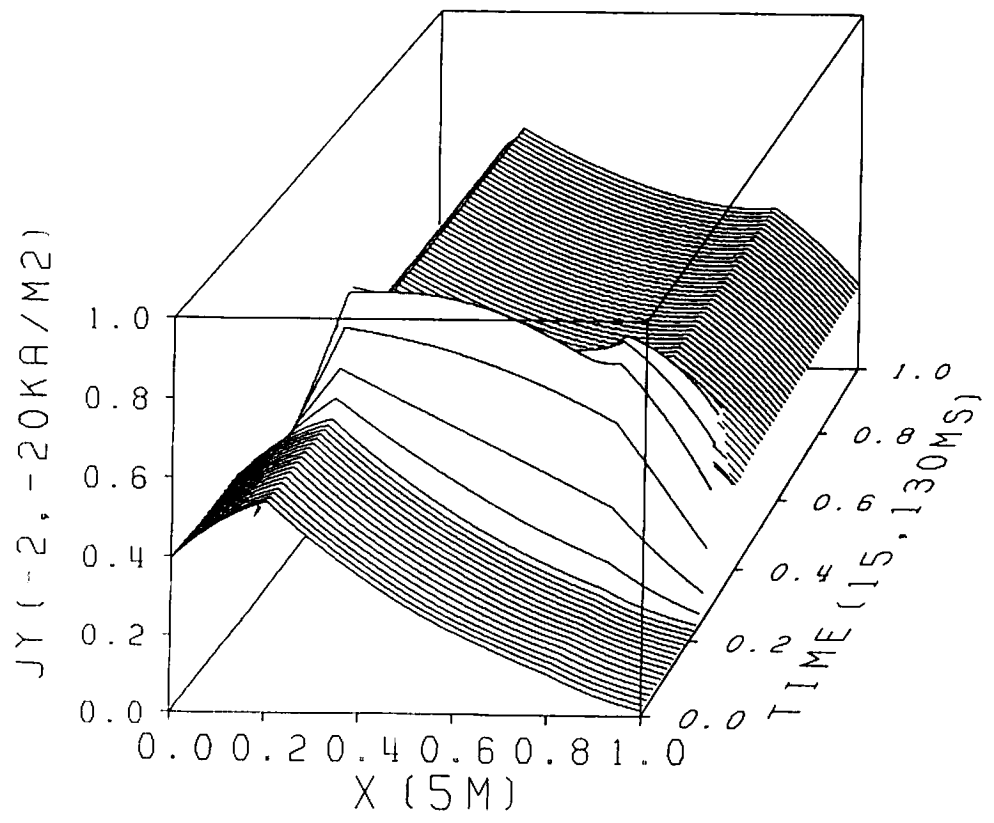


図2-5(5).12 1線断線事故時の J_y