

模擬送電装置のパラメータ推定

— 柳勝宏・小林英夫

Parameter Estimation for Power System Simulator

Katsuhiro ICHIYANAGI and Hideo KOBAYASHI

The optimal controls with the error of mesured parameter values are not sensitive enough. This paper presents a method to estimate the parameter values with accuracy for non-linear system. The basic principle of the method is the algorithm that is based on weighted-least-squares estimation theory. The proposed method was used to estimate the parameters of the AC power system simulator. It is shown that the unknown parameters are estimated with accuracy within 30 iterations.

The method was modified to process the two or more kinds of transient phenomenon data simultaneously, and good results were obtained.

1. まえがき

電力系統のパラメータ値を正確に把握することは、種々の制御問題を取扱う上で重要である。また、最適制御系を構成する際におけるパラメータ値の測定誤差は、その制御効果を大きく鈍らせる結果となる^{(1),(2)}。これまでに、パラメータ推定（以下、P.Eと略す）に関する種々の研究がなされているが^{(3),(4),(5)}いずれも、取扱う系は、線形系の場合に限られている。

システムが非線形の場合にも、一般的に取扱えるようなP.Eプログラムについて、著者らは、先に報告している⁽⁶⁾。この手法は系を元の非線形系のままで用いているので、(1)大きな系統動揺が取扱えるから、観測データに含まれるノイズの割合は少なくでき、(2)定数項のP.Eも可能となり、さらに、(3)対象とする系の方程式をEXTE-RNAL関数として与えるのみでよい、(4)安定化制御のためのフィードバックゲインを決定する際にも利用できる、などの特徴がある。このP.Eプログラムを利用することにより、当研究室の模擬送電装置のP.E計算を行い、その結果について、今回報告する。

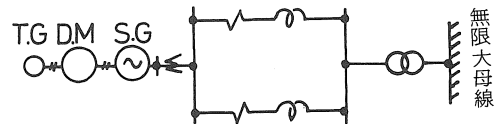
また、先に開発したP.Eプログラムを一部修正し、2種以上の過渡現象データを同時処理することにより、軽負荷から重負荷にわたるいずれの状態においても適用できるパラメータ値の推定結果についても報告する。

2. 模擬送電装置とパラメータ推定結果

先に開発したP.Eプログラム（付録参照）を利用し、当研究室の模擬送電装置を用いて行ったP.E結果につい

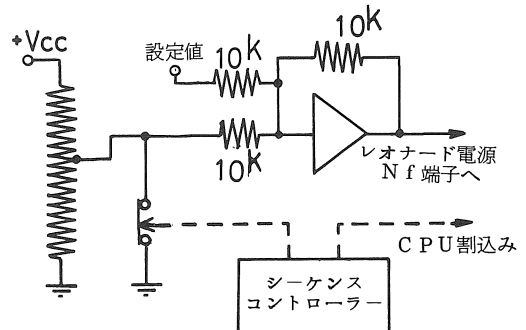
て述べる。

〈2・1〉 模擬送電装置 P.Eの対象とする模擬送電装置の概略図を第1図に示す。ここで、発電機S・G



第1図 模擬送電装置

(3kW, 220V, 3φ, 60Hz)の原動機D.Mは、直流分巻電動機(3.7kW, 100V, 1800r.p.m.)を使用し、原動機電源は、サイリスタレオナード電源を用いており、これへのフィードバックは、速度信号の他、流入電流信号も加えて使用し、S.Gへの機械的入力の設定制御を行っている。さらに、P.Eを行うために、この設定制御の設定値にステップ状電圧信号を付加することにより、発電機



第2図 機械的入力急変回路

の機械的入力を急変し、系統動揺を与えている。(第2図)

また、この模擬送電装置には、シーケンスコントローラや小形計算機(記憶容量8k語)が接続しており、過渡動揺の実験データとしては、サンプリング周期1/60(秒)で、発電機内部電圧位相差信号 δ や、発電機への機械的入力 P_m が、紙テープにバイナリデータとしてパンチ出力できる。

なお、このときの δ 信号検出は、S.Gと同軸に連結したタコジェネレータT.Gを用い、これの端子電圧と無限大母線との位相差から、直接直流電圧として検出できるように作った「位相検出器」を用いている。

〈2・2〉 模擬送電装置の数学モデルとパラメータ推定. 第1図に示した模擬送電装置について、系の動揺は、次式で表わされるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \omega \\ \dot{\omega} &= \left(\frac{\omega_0}{M} \right) (P_m - P_{em} \sin \delta) - \left(\frac{D_g}{M} \right) \cdot \omega \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

出力方程式は

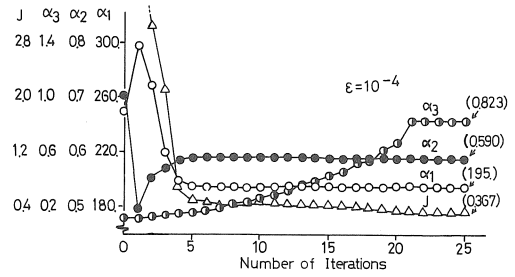
$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

とする。ただし、 M :慣性定数、 P_m : 発電機への機械的入力、 $P_{em} (=E_1 E_2 / X_{12})$: 最大送電電力、 $E_1 \angle \delta$ および $E_2 \angle 0$: 発電機内部端子および無限大母線電圧の大きさおよび位相、 X_{12} : 発電機内部端子と無限大母線間の伝達リアクタンス、 D_g : 制動係数、 ω_0 : 基準角周波数($= 2\pi \times 60$)である。

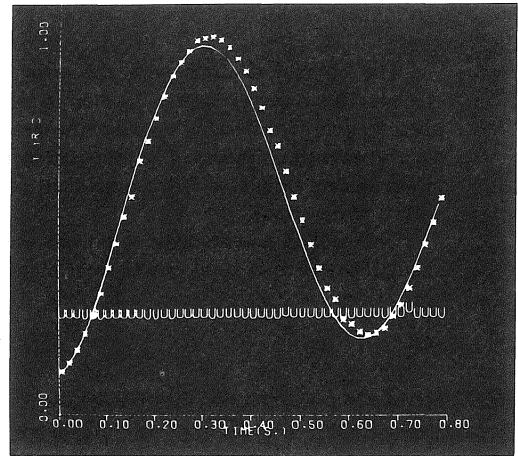
ここで、先に報告した「非線形系のパラメータ推定法」⁽⁶⁾(付録参照)により、P.E計算を行うために、未知パラメータとして、 $\alpha_1 = \omega_0/M$ 、 $\alpha_2 = P_{em}$ 、 $\alpha_3 = D_g/M$ とし、さらに、擾乱 $D = P_m$ とする。系の過渡動揺は、

- A: $P_m = 0.049 \rightarrow 0.308$ p.u.
- B: $P_m = 0.049 \rightarrow 0.222$ p.u.
- C: $P_m = 0.049 \rightarrow 0.136$ p.u.

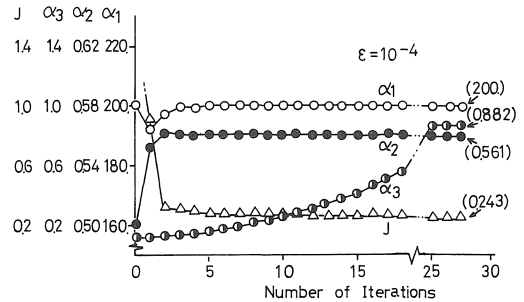
の三ケースについて行い、各々の場合について、紙テープデータを別のオフライン計算機(記憶容量32k語、グラフィックディスプレイ付)に入力することにより、P.E計算を行う。その結果A~Cの三ケースについて、 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ の繰り返し計算回数毎の値を、それぞれ第3図~第5図における(a)で示す。また、得られたP.Eの最終値 $\alpha_1^* \sim \alpha_3^*$ を用いて、(2)式より計算される出力 y と実測値 y_r の動揺曲線を、各々第3図~第5図における(b)に示す(図中、記号 \cup は $D = P_m$ を表わし、*は y_r 、実線は y である)。各々の図において、曲線 y は、実測値*に近い値となり、P.Eの効果がわかる。しかし、擾乱の大



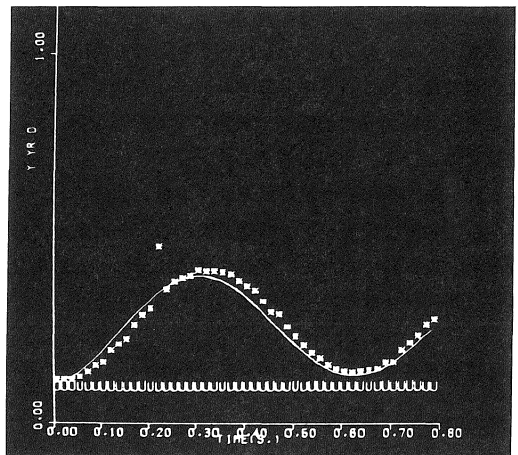
第3図(a) パラメータ推定(ケースA)



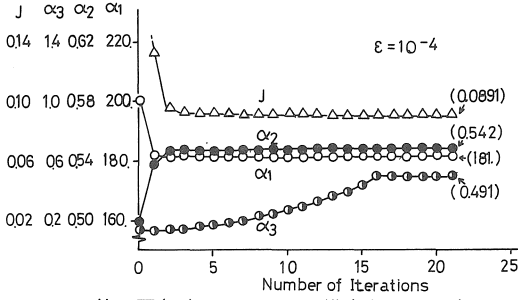
第3図(b) パラメータ推定(ケースA)



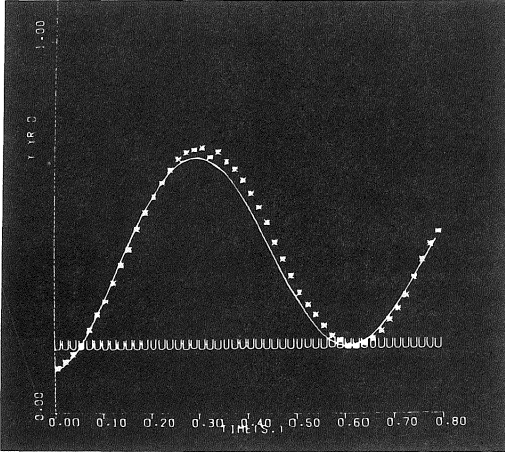
第4図(a) パラメータ推定(ケースB)



第4図(b) パラメータ推定(ケースB)



第5図(a) パラメータ推定(ケースC)



第5図(b) パラメータ推定(ケースC)

きさに対する $\alpha_1^* \sim \alpha_3^*$ の各値は、僅かではあるが、共に異なる値となっていることが、同図(a)からわかる。これらの値のずれが大ききとき、1つの過渡現象データのみを用いて得られるP.E値は、別の系統状態では、必ずしも使用できるとは限らないことになる。このことについて、次章で考察する。

3. パラメータ推定法(その2)

前章において、擾乱の大きさの異なる三ケースの過渡現象データを個々に用いた場合のP.E結果について述べた。前述した様に、得られた $\alpha_1^* \sim \alpha_3^*$ の各値は、いずれも僅かにずれている。このずれの原因として、用いた模擬送電装置の数学モデルが、(1), (2)式で示すような簡略モデルを仮定しており、擾乱発生後、一定と仮定した P_m 値や、発電機内部電圧 E_1 値の変動によるものと思われる。いずれの状態においても使用できるパラメータ値を得るためには、できる限り多くの状態毎の過渡現象データを用いて、これらの同時処理によるP.Eを行うことが必要である。

〈3・1〉 複数の過渡現象データの同時処理によるパラメータ推定⁽⁷⁾ 対象とする系は、(付1)および(付2)式で示されるものとする。ここで、擾乱 D の種類を

k とし、この k 個の過渡現象に対応する系の状態変数 x 、出力 y を1~ k の添字を付して表わすと、パラメータ推定問題は、

$$\dot{\hat{x}} = \hat{f}(\alpha, \hat{x}, \hat{D}), \quad \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \quad (3)$$

$$\hat{y} = \hat{c}(\alpha, \hat{x}) \quad (4)$$

の系に対して、評価関数

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (\hat{y}_r - \hat{y})^T \hat{R} (\hat{y}_r - \hat{y}) dt \quad (5)$$

を最小にするようなパラメータ α を求める問題となる。ただし、

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}, \quad \hat{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_k \end{bmatrix},$$

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} f(\alpha, x_1, D_1) \\ f(\alpha, x_k, D_k) \end{bmatrix}, \quad \hat{y}_r = \begin{bmatrix} y_{r1} \\ \vdots \\ y_{rk} \end{bmatrix},$$

$$\hat{c} = \begin{bmatrix} c(\alpha, x_1) \\ c(\alpha, x_k) \end{bmatrix}$$

である。したがって、パラメータ推定値を得るための漸化式は、(付10)式に対応して次式となる。

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + L^{-1}N \quad (6)$$

ここで

$$L = \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial \alpha} \right)_{a_i}^T \hat{R} \left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial \alpha} \right)_{a_i} dt$$

$$N = \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial \alpha} \right)_{a_i}^T \hat{R} (\hat{y}_r - \hat{y}(\alpha_i)) dt$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \hat{x}}{\partial \alpha} \right)_{a_i} = \left(\frac{\partial \hat{f}}{\partial \alpha} \right)_{a_i} + \left(\frac{\partial \hat{f}}{\partial \hat{x}} \right)_{a_i} \cdot \left(\frac{\partial \hat{x}}{\partial \alpha} \right)_{a_i}$$

$$\left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial \alpha} \right)_{a_i} = \left(\frac{\partial \hat{c}}{\partial \alpha} \right)_{a_i} + \left(\frac{\partial \hat{c}}{\partial \hat{x}} \right)_{a_i} \cdot \left(\frac{\partial \hat{x}}{\partial \alpha} \right)_{a_i}$$

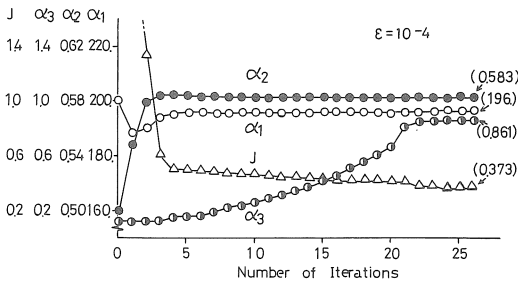
ゆえに、複数の過渡現象データを同時処理することによるパラメータ推定計算も、付1図に示す計算フロー図に従って行うことになる。

〈3・2〉 適用例 対象とした模擬送電装置は、前章と同じであり、用いる過渡現象データも同じで、ケースA, B, Cの3データのいずれか2種を同時に用いるものとする。すなわち、

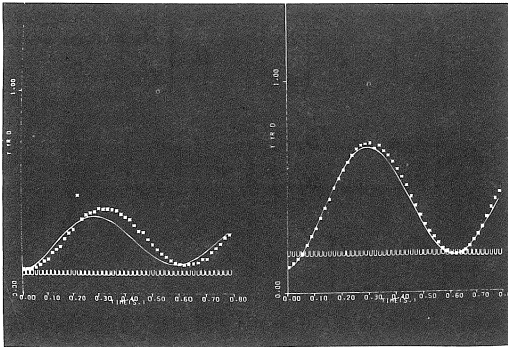
$$\text{I} \begin{cases} \text{A} (P_m = 0.049^{P.u} \rightarrow 0.308^{P.u}) \\ \text{B} (P_m = 0.049^{P.u} \rightarrow 0.222^{P.u}) \end{cases}$$

$$\text{II} \begin{cases} \text{B} (P_m = 0.049^{P.u} \rightarrow 0.222^{P.u}) \\ \text{C} (P_m = 0.049^{P.u} \rightarrow 0.136^{P.u}) \end{cases}$$

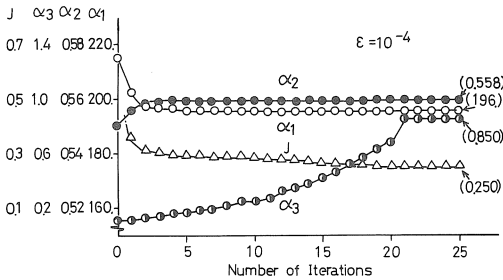
の二ケースについて、各々2種の過渡現象データの同時処理によるP.E計算を行う。このときの結果を第6図および第7図に示す。また、前章で得られたP.E結果との比較を第1表に示す。これによると、2種の過渡現象デ



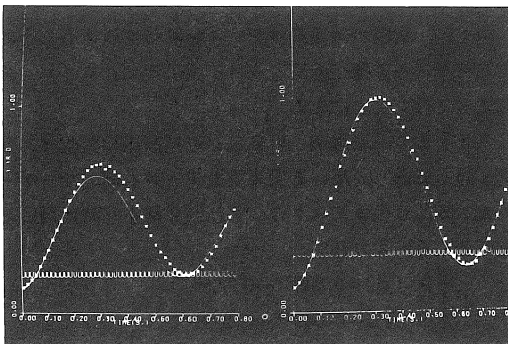
第 6 図 (a) パラメータ推定(ケース I)



第 6 図 (b) パラメータ推定(ケース I)



第 7 図 (a) パラメータ推定(ケース II)



第 7 図 (b) パラメータ推定(ケース II)

ータの同時処理による P.E 結果, ケース I および ケース II の場合は, 単独の過渡現象データを用いた場合のケース A~C と比較して, J の値の増加もほとんどなくして P.E が可能であることがわかる。今回は, 計算機の記憶

第 1 表 パラメータ推定結果の比較

	A	B	C	I (A&B)	II (B&C)
$\alpha_1 = \omega_0/M$	195.	200.	181.	196.	196.
$\alpha_2 = Pem$	0.590	0.561	0.542	0.583	0.558
$\alpha_3 = Dg/M$	0.823	0.882	0.491	0.861	0.850
J	0.367	0.243	0.0891	0.373	0.250
Fig. No.	Fig 3	Fig 4	Fig 5	Fig 6	Fig 7

容量や計算時間などの制約から, 2 種の過渡現象データを同時に用いて, P.E 計算を行っているが, さらにこれ以上に多くの種類のデータ数を同時に用いる P.E を行うことにより, すべての擾乱の種類や大きさに対し, 共通なパラメータ値が得られ, この値を用いて行う安定化制御も有効に行える。

4. む す び

交流模擬送電装置の P.E 計算を行い, 先の報告⁽⁶⁾と同様, 良好な結果が得られた。本報告では, 2 種以上の過渡現象データを同時処理することによる P.E 計算法とプログラムを開発し, 実用面での検討を加えている。なお, 用いたパラメータ推定のための模擬送電装置の数学モデルは, 発電機の AVR やガバナなどの制御装置の動作を考慮せず, また, 線路や発電機の抵抗を無視することによる簡略モデルを仮定している。安定化制御の目的のためのシステムのモデリングは, 必ずしも詳細なモデルを用いる必要がないと思われる。すなわち, システムの数学的モデルは, できる限り簡略化した等価なモデルで表わすことにより, 安定化制御に必要な制御方式も簡単になる。このことから, むしろ, システム簡略化のためのモデリングが, 実運用上必要なことである。本報告では, 複数の過渡現象データを同時に用いて, P.E 計算を行うことにより, システム簡略化のためのモデリングも可能とした。

なお, 計算に使用したミニコンは, OKITAC-4300 C (当研究室内設置) および YHP-21MX (本学計算センター内設置) であることを附記する。

付 録

最小自乗法による非線形系のパラメータ推定法⁽⁶⁾

対象とする系が, (付 1) および (付 2) 式で表わされるものとする。

$$\dot{x} = f(\alpha, x, D), \quad x(0) = x_0 \quad (\text{付 1})$$

$$y = c(\alpha, x) \quad (\text{付 2})$$

ここで, $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ は状態ベクトル, $\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_p]^T$ は未知パラメータベクトル, $D = [D_1 \ D_2 \ \dots$

D_s^T は系統の擾乱ベクトルであり、さらに、 $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]^T$ は出力ベクトルとする。また、出力 y の実測値を y_r とし、最小自乗法による P.E を行うための評価関数として、(付3)式を用いる。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (y_r - y)^T R (y_r - y) dt \quad (付3)$$

y を未知パラメータ α の初期推定値 α_0 の近傍でテラ級数に展開すると、

$$y(\alpha) = y(\alpha_0) + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} (\alpha - \alpha_0) + \dots \quad (付4)$$

となる。ここで、第3項以降を無視できるものとし、これを(付3)式に代入し、 $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$ とすると、次式になる。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [y_r - y(\alpha_0) - \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} \Delta\alpha]^T R [y_r - y(\alpha_0) - \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} \Delta\alpha] dt \quad (付5)$$

上式の評価関数 J を最小とする α の値 α_1 を求めるため、

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta\alpha} = 0 \text{ とおくと、次式が得られる。}$$

$$L \Delta\alpha = N \quad (付6)$$

したがって、

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta\alpha = \alpha_0 + L^{-1} N \quad (付7)$$

となる。ここで、

$$L = \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0}^T R \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} dt \quad (付8)$$

$$N = \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0}^T R (y_r - y(\alpha_0)) dt \quad (付9)$$

である。ゆえに、パラメータ推定値を求めるための漸化式は、(付7)式より次式となる。

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + L^{-1} N \quad (付10)$$

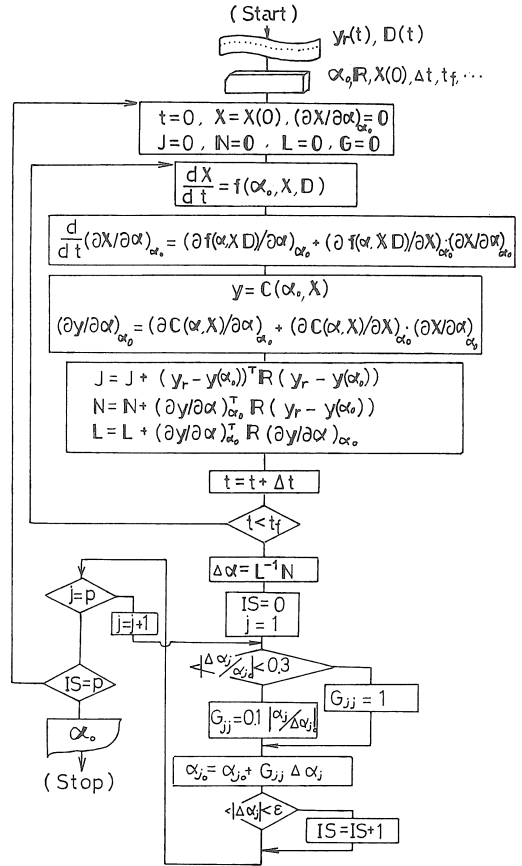
なお、(付8)、(付9)式中、 $\left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0}$ は、(付1)、(付2)式を α で偏微分することにより得られる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} = \left\{ \frac{\partial f(\alpha, x, D)}{\partial \alpha} \right\}_{\alpha_0} + \left\{ \frac{\partial f(\alpha, x, D)}{\partial x} \right\}_{\alpha_0} \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} \quad (付11)$$

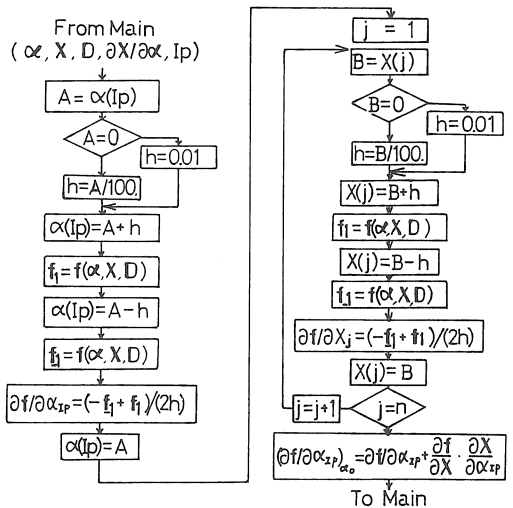
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} = \left\{ \frac{\partial c(\alpha, x)}{\partial \alpha} \right\}_{\alpha_0} + \left\{ \frac{\partial c(\alpha, x)}{\partial x} \right\}_{\alpha_0} \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} \quad (付12)$$

パラメータ推定のための計算フロー図を付1図に示す。

なお、ここで用いる P.E 法は与えられる系が(付1)、(付2)式であり、非線形の一般的な形で表わされるため、(付11)、(付12)式中の



付1図 パラメータ推定計算フロー図



付2図 $\partial f / \partial \alpha$ の計算フローチャート

$\left(\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0}$, $\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{\alpha_0}$, $\left(\frac{\partial c}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0}$, $\left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{\alpha_0}$ は、線形の場合のように、解析的な微分展開ができない。したがって、

与えられたシステムを変更する場合、原関数 f ，および c の他に偏微分計算を行うために作成した関数プログラムをすべて大幅に変更しなければならない。このため、 f ， c 関数のみを EXTERNAL 関数として与え、前述の偏導関数の計算を「数値微分の3点公式」を用いて行うことにより、プログラム変更の煩わしさをできる限り少なくし、かつ計算機の使用メモリーを節約している。数値微分の3点公式を用いた非線形偏導関数、

$\frac{\partial \{f(\alpha, x, D)\}}{\partial \alpha}$ の計算フロー図を付2図に示す。なお偏

導関数 $\left\{ \frac{\partial c(\alpha, x)}{\partial x} \right\}$ の計算は、外部関数 $f(\alpha, x, D)$

を $c(\alpha, x)$ で置き換えるのみに同じプログラムが使用できる。

参考文献

- (1) 小林・一柳：“交直並列送電系統の Bang-bang 形最適定電流制御” 電学論 B, 97-5, p247, (昭52)
- (2) H.Kobayashi & K.Ichiyanagi：“Improvement of the Transient Stability by Optimal Switching Control of Parallel AC-DC Power Systems” IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-97, No.4, P1140 (1978).
- (3) C.C.Lee & Owen T.Tan: “A Weighted-Least-Squares Parameter Estimation for Synchronous Machines” IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-96, No.1, P97 (1977).
- (4) 遠山・長谷川・藤原：“同期機のパラメータ同定(Ⅳ)” 昭54電気学会全国大会No.860.
- (5) 宮本・成田・竹内：“最尤法による同期機のパラメータ推定” 電気学会情報処理研究会, IP-79-54 (昭54. 9. 21).
- (6) 一柳・小林：“交直並列送電系統のパラメータ推定” 電気学会情報処理研究会, IP-79-51. (昭54. 9. 21).
- (7) 一柳・小林：“交直並列送電系統のパラメータ推定(Ⅲ)” 昭55電気学会全国大会, No.851.
(受理 昭和55年1月16日)