

《論文》

論 3—6

入出力データに基づく電力系統動特性の推定[†]

小野 治・都築旋二*

ABSTRACT In this paper, we estimate dynamical property of power system by means of sampling values of tentative data measured in electrical load change.

Generally, dynamics of power system can be represented by a transfer function with some physical parameters, however these are desided by using trial and error method as usual. Then it is difficult to perform this calculation.

Meanwhile, we construct a discrete time power system model directly by use of frequency and tie-line power data. This is based on computation of impulse response series and evaluating eigenvalues, eigenvectors of controllable matrix.

The effectiveness is pointed out in application to some practical power systems. Simultaneously the attribute values are computed and the frequency fluctuations are compared.

1. まえがき

大規模な電力連系系統においては、一地域に発生した大電源脱落等が各地域系統の周波数および連系線潮流に非常に複雑な影響を及ぼすことがよく知られている。このことは負荷遮断試験とともに実測結果においても明白に現われている。従来このような電力系統の動特性を把握するためには、一般に物理的な考察に基づく伝達関数によって考察されてきた¹⁾。その基本的手法は伝達関数による応答結果と実測結果を比較検討することによって動特性の推定を行なうというものである。このような解析は理論式の展開と実測時に見られる現象とを対応づけて考察することができるという利点があるものの、非常に多くの試行錯誤的なくり返しを必要とし、明快な決定を得ることが困難である。

本論文ではこの点を克服する一手法として、実測データに忠実にそしモデルを実測データのみから離散化することによって構成することを行なっている。すなわち、負荷遮断電力、連系線潮流変動、周波数変動の実測データを用いていくつかの変換を行ない妥当な電力系統特性を把握するものであり、従来のような試行

Estimation of Power System Dynamical Characteristics Based on Input and Output Data. By Osamu Ono and Senji Tsuzuki (School of Engineering, Meiji University)

* 明治大学工学部電気工学科

† 1983年10月17日受付

錯誤をほとんど必要とせず計算を実行することができる。また、離散系とそれに対応する連続系の主要な極および零点を一致させることによって従来の物理的な考察に基づく電力系統の各特性定数を短時間のうちに推定することができる。従来多くのデータから算出されたのに比べ非常に容易に求められる特長をもつていい。

本論文第2章では考察の対象とする電力系統の周波数変動量および連系線潮流変動量の実測データの離散化について述べる。第3章では従来より得られている物理的考察に基づく単一地域系統の伝達関数について特に極・零点の配置について考察する。第4章では z 変換を用いた入出力データに基づく電力系統のモデル化の手法を示す。第5章では系統定数の一算出法を示す。第6章では中部地域系統と九州地域系統について試算の例を示す。

2. 実測データの離散化

負荷遮断試験等における電力系統の実測データは従来より一般的に連続量として測定記録されている。ここではこのデータを一定のサンプリング周期で離散化し、計算機で処理しやすい形に変換する。離散化対象実測データは一地域系統に注目した場合の負荷遮断電力量、その系統へ流入する連系線潮流変動量および系統の周波数変動量である。本論文では中部地域系統と九州地域系統における負荷遮断試験時の実測データを

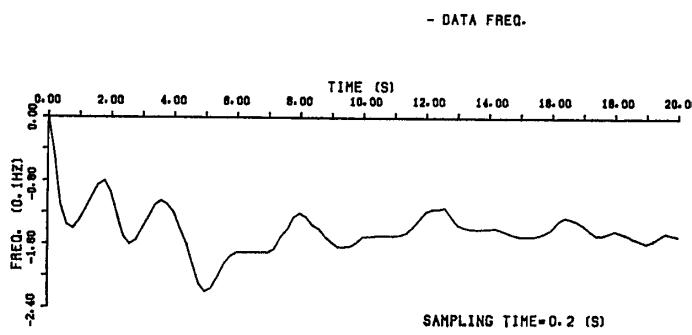


図 1-a 周波数変動（中部地域系統）

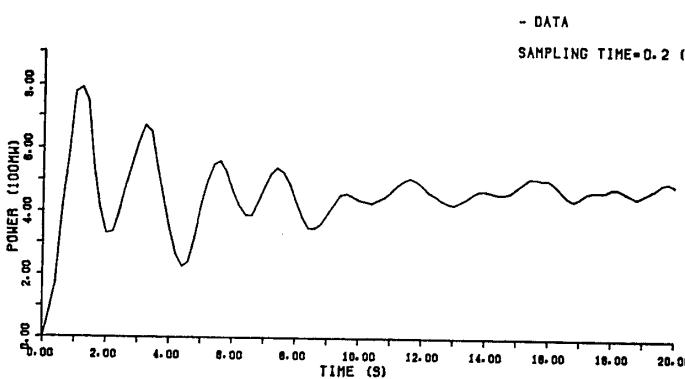


図 1-b 連系線潮流変動（中部地域系統）

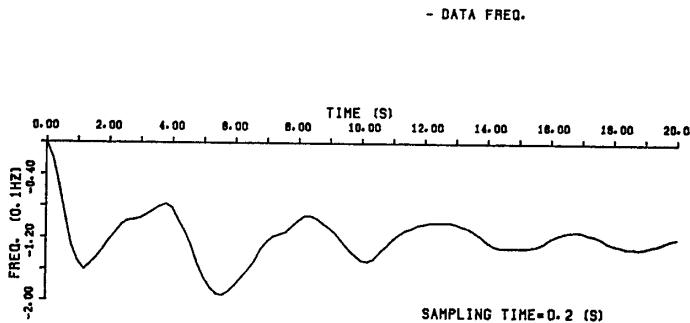


図 2-a 周波数変動（九州地域系統）

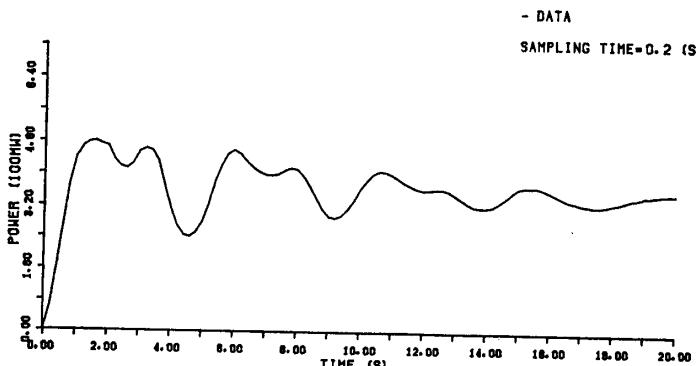


図 2-b 連系線潮流変動（九州地域系統）

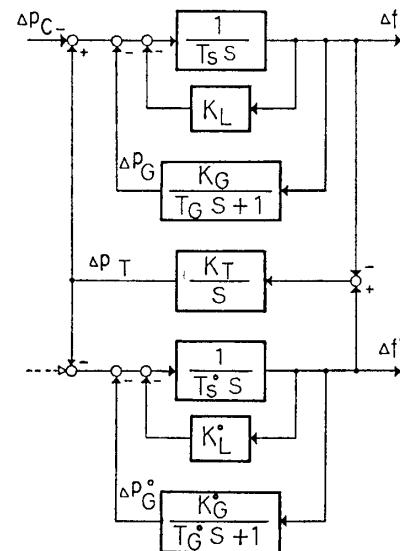


図 3 連系系統ブロック線図

対象とする。計算機処理するため0.2秒周期でサンプリングを行ない、これを図1-a,b、図2-a,bに示す。

一方データサンプリング数の増大は計算機の処理能力や計算時間に非常に大きな影響があり、小型計測制御計算機使用の場合には大きな制約条件となる。このように電力系統の周波数動特性の時間領域やサンプリング数等を鑑みると、0.2秒のサンプリング周期が妥当であろうと考える。

3. 電力系統の伝達関数

いくつかの地域の電力系統が連系線によって結合されている場合、全体として大きくとらえると図3のように、注目する一地域系統とその他の地域を一括した系統という二連系系統として把握することができる。この場合一つの伝達関数で入出力を考えると全体として5次元の系となる²⁾。

考察の対象としている地域系統のみをこの中からとり出すと、単一地域の電力系統のブロック線図は図4のようになる。実測データとして与えられている負荷遮断電力量、連系線潮流変動量、周波数変動量がそれぞれ図4ブロック線図の Δp_c , Δp_T , Δf に対応しているものと考えられる。

この仮定のもとにこれらの伝達関数の各パラメータすなわち特性定数を求める一手法を第5章に示す。

このブロック線図において入力 $\Delta p_T - \Delta p_c$ 、出力 Δf として伝達関数を求める式は次のようになる。

$$G(s) = \frac{\frac{1}{T_s} \left(s + \frac{1}{T_G} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_L}{T_s} + \frac{1}{T_G} \right) s + \frac{K_L + K_G}{T_s T_G}} \quad (1)$$

各パラメータ定数はそれぞれ次のような意味をもつものと考えられる。

K_L : 負荷の周波数特性定数

K_G : 等価調速機の周波数特性定数

T_s : 系統慣性定数

T_G : 等価調速機の時定数

この伝達関数の零点 s_0 および極 s_p^\pm は明らかに

$$s_0 = -\frac{1}{T_G} \quad (2a)$$

$$s_p^\pm = -\frac{1}{2} \left(\frac{K_L}{T_s} + \frac{1}{T_G} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{K_L}{T_s} + \frac{1}{T_G} \right)^2 - \frac{4K_G}{T_s T_G}} \quad (2b)$$

となるが、特に電力系統として標準的な K_L, K_G, T_s, T_G を考えると、

$$I_m(s_p^\pm) \neq 0 \quad (3)$$

であり³⁾,

$$R_e(s_0) - 2R_e(s_p^\pm) > 0 \quad (4)$$

となる。すなわち、零点 s_0 は常に図5に示すように共役複素極 s_p^\pm によって決められる線分 \overline{AB} の実軸上に存在する。

また、時定数 T_s, T_G の比と負荷特性 K_L とにおいて次のような関係がある場合には

$$\frac{T_s}{T_G} > K_L \quad (5)$$

零点は図5の線分 \overline{AM} 上に存在することになる。

以上の事実は離散値系モデルより各特性定数を求めるときの極および零点配置の目安となる。

また状態変数として $\Delta f, \Delta p_G$ を選び、サンプリング周期を τ とすると、次のような離散値状態方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \Delta f(k+1) \\ \Delta p_G(k+1) \end{pmatrix} &= e^{A\tau} \begin{pmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta p_G(k) \end{pmatrix} \\ &+ (e^{A\tau} - I) A^{-1} \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_s} \\ 0 \end{pmatrix} \Delta p(k) \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\Delta f(k) = (1 \ 0) \begin{pmatrix} \Delta f(k) \\ \Delta p_G(k) \end{pmatrix} \quad (6a)$$

ただし、

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_L}{T_s} & -\frac{1}{T_s} \\ \frac{K_G}{T_G} & -\frac{1}{T_G} \end{pmatrix} \quad (6c)$$

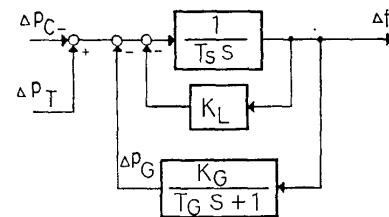


図4 統系ブロック線図

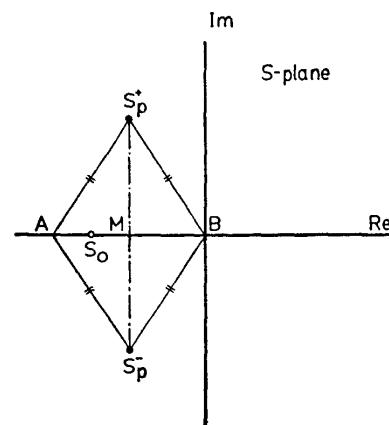


図5 零点・極の配置

したがって電力系統のパルス伝達関数は

$$G(z) = (1 \ 0) \{zI - e^{A\tau}\}^{-1} (e^{A\tau} - I) A^{-1} \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_s} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

となる。次章ではこれと相似な離散値状態方程式を実測データのみから求める一手法を示す。

4. 入出力実測データによる

離散値系モデルの構成法

単一地域の電力系統に注目すると、図4のように系統に入力する電力変化量は負荷遮断電力量と連系線潮流変動量の和と考えることができる。したがって電力変化量の z 変換 $\Delta P(z)$ はそれぞれのサンプリング値 $\Delta p_c(i) = \Delta p_c(\text{一定}), \Delta p_T(i), i=0, 1, 2, \dots$ により、

$$\begin{aligned} \Delta P(z) &= (\Delta p_T(0) - \Delta p_c) \\ &+ (\Delta p_T(1) - \Delta p_c) z^{-1} + \dots \\ &= \Delta p(0) + \Delta p(1) z^{-1} + \Delta p(2) z^{-2} + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

とおくことができる。一方、周波数変動量 $\Delta f(i), i=0, 1, 2, \dots$ の z 変換 $\Delta F(z)$ は

$$\Delta F(z) = \Delta f(0) + \Delta f(1) z^{-1} + \Delta f(2) z^{-2} + \dots \quad (9)$$

として得られる。このとき電力系統のパルス伝達関数を、

$$G(z) = \sum_{i=0}^{\infty} g_i z^{-i} \quad (10)$$

という重み系列 g_i によって表現すると、

$$\Delta F(z) = G(z) \Delta P(z) \quad (11)$$

であるから、両辺の式を展開し係数を整理することによって、

$$\begin{aligned} \Delta f(0) &= g_0 \Delta p(0) \\ \Delta f(1) &= g_1 \Delta p(0) + g_0 \Delta p(1) \\ \Delta f(k) &= g_k \Delta p(0) + g_{k-1} \Delta p(1) + \cdots + g_0 \Delta p(k) \end{aligned} \quad (12)$$

以上の式が得られる。

したがって $\Delta f(k)$, $\Delta p(k)$ は実測データとして与えられるから逆に、

$$\begin{aligned} g_0 &= \Delta f(0) / \Delta p(0) \\ g_1 &= \{\Delta f(1) - g_0 \Delta p(1)\} / \Delta p(0) \\ g_k &= \{\Delta f(k) - g_{k-1} \Delta p(1) - \cdots - g_0 \Delta p(k)\} / \Delta p(0) \end{aligned} \quad (13)$$

として重み系列 g_i が逐次算出される⁴⁾。

一般的な電力系統においては g_i の絶対値は定常状態に近づくにつれて小さい値となる。そこで、 n サンプリング以後は一定比率で減衰すると仮定することができる。たとえばこの減衰比を q とおく。

さらに定常値からの偏差を考えており、 $\Delta f(0)=0$ で g_0 は零となる。以上のようにして求められた係数 g_i および q によって次のような状態方程式を構成することができる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{Ax}(k) + \mathbf{b} \Delta p(k) \quad (14a)$$

$$\Delta f(k) = \mathbf{c}' \mathbf{x}(k) \quad (14b)$$

ただし、 $\mathbf{x}(k)$, \mathbf{A} , \mathbf{b} , \mathbf{c} はそれぞれ

$$\mathbf{x}(k) = (x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_n(k))' \quad (14c)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & & & \\ \vdots & & & \\ & I_{n-1} & & \\ 0 & & \ddots & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & q \end{pmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{pmatrix} \quad (14d)$$

$$\mathbf{c}' = (1 \ 0 \ \cdots \ 0) \quad (14e)$$

という行列およびベクトルである。

以上の状態方程式の次元はサンプリング数に依存し一般に高次元となって現実的でない。そこで実質的に可制御な状態だけを取り出す。これを行なうには可制御行列 \mathbf{V} より \mathbf{VV}' の固有値を求め、主要な固有値に対する固有ベクトルによって適切な次元の離散値状態方程式を算定すれば良い。すなわち、次のようないくつかの手順を踏むこととする。

Step 1 \mathbf{A}, \mathbf{b} より可制御行列 \mathbf{V} を求める。

Step 2 \mathbf{VV}' の固有値、正規固有ベクトルを求める。

\mathbf{VV}' は対称行列であるから Jacobi 法を用いることができる。

Step 3 主要な固有値 $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_m$ ($m < n$) を選び、それに対応する正規固有ベクトル $w_1 \cdots w_m$ から変換行列 \mathbf{T}

$$\mathbf{T} = (w_1 : w_2 : \cdots : w_m) \quad (*)$$

を求める。

Step 4 変換行列 \mathbf{T} より離散値状態方程式モデル

$$\mathbf{x}^*(k+1) = \mathbf{A}^* \mathbf{x}^*(k) + \mathbf{b}^* \Delta p(k) \quad (**)$$

$$\Delta f(k) = \mathbf{c}' \mathbf{x}^*(k)$$

の \mathbf{A}^* , \mathbf{b}^* , \mathbf{c}' を次のようにして求める。

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{T}' \mathbf{A} \mathbf{T}$$

$$\mathbf{b}^* = \mathbf{T}' \mathbf{b} \quad (***)$$

$$\mathbf{c}' = \mathbf{c}' \mathbf{T}$$

以上のような手続きによって電力系統の離散値状態方程式モデルを得る⁵⁾。

5. 系統定数の一算定法

電力系統のモデル次元は第3章で示したように一般に2次元と考えることができますので、前章におけるような実測されたサンプリングデータからの主要な固有値の個数としては2個と考えられる。

$$\begin{aligned} G(z) &= \mathbf{c}' (z\mathbf{I} - \mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{b}^* \\ &= \frac{b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \end{aligned} \quad (15)$$

この伝達関数の零点および極をそれぞれ z_0, z_p^\pm とすると、対応する連続系モデルの S 平面における零点 s_0 および極 s_p^\pm はサンプリング周期を τ とすると、

$$\tilde{s}_0 = \frac{1}{\tau} \operatorname{Log} z_0 \pm j \frac{2n\pi}{\tau} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (16a)$$

$$\tilde{s}_p^\pm = \frac{1}{\tau} \operatorname{Log} z_p^\pm \pm j \frac{2n\pi}{\tau} \quad (16b)$$

となる。ただし、関数 Log は $\operatorname{Log}(re^{j\theta}) = \log r + j\theta$ である⁶⁾。明らかに一意に決定することはできない。しかし第3章に示したように電力系統の物理的な考察に基づく零点および極は図5のような配置と考えられ、しかも主要な零点および極として原点近傍の一つの零点 s_0 と一对の複素極 s_p^\pm を選ぶ必要がある。さらに定常値が一致するようにすると、次のような2次の伝達関数 $G(s)$

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{s - s_0}{(s - s_p^+)(s - s_p^-)} \cdot \left(-\frac{s_p^+ s_p^-}{s_0} \right) \cdot k_p \\ k_p &= \frac{b_1 + b_0}{1 + a_1 + a_0} \end{aligned} \quad (17)$$

となる。 $(k_p$ は定常値) このようにして得られた伝達関数と第3章(1)式との各係数を対応させることによ

り、電力系統の各系統定数 T_s, T_G, K_L, K_G を算定することができる付1)。

6. 実系統における動特性推定の試算

前章までの解析方法を実電力系統に適用する。使用するデータは昭和49年に中地域技術研究連絡会・西日本研究連絡会合同で行なわれまとめられた 60Hz 系の電力系統特性試験結果報告書⁷⁾に基づくものである。特に中部地域系統と九州地域系統を対象とする。負荷遮断時の周波数変動および連系線潮流変動の実測データから系統の離散値状態方程式および入出力等価なパルス伝達関数を求める。得られた系統モデルの妥当性を検討するためにモデルから推定される周波数変動と実測によって得られた周波数変動との比較を行なう。

次に 2 次元のモデル化から実系統の系統定数を算定する。

6.1 実測データ

中部地域系統に対しては、中部電力知多火力 4 号機 700MW 遮断ガバナテスト（昭和49年3月14日17時59分59秒62）における周波数変動および中部一関西連系線（西部～南京都線）有効潮流変動を対象データとする。また九州地域系統に対しては、九州電力川内火力 1 号機 500MW 遮断ガバナテスト（昭和49年4月23日14時20分00秒45）における周波数変動および九州一中国連系線（新関門幹線）有効潮流変動を対象データとする。それぞれ 0.2 秒のサンプリング周期で離散化したデータを図 1a, b および図 2a, b に示す。以下図中周波数については 0.1Hz を 1 単位とし、電力量については 100MW を 1 単位としている。

6.2 離散値状態方程式モデル

本解析手法によって電力系統パルス伝達関数 $G(z)$ の重み系列 $g_i (i=1, 2, \dots, 60)$ を求めると表 1 のようになる。

これより、システムの応答は $i=60$ 附近ではほぼ定常状態に達したものと推測し、 $i=60$ までの g_i を使用する。さらに $i=61$ 以上の g_i については $q=0.5$ で減衰するものと仮定する。すなわち、計算には最初の 12 秒間のデータのみを使用する。なお、負荷遮断時から約十数秒程度以降は周波数を規定値に保つための制御（負荷周波数制御等）が働き出すものと考えられ、この時刻以後のデータから求められるパラメータ g_i には電力系統の複雑な要素が含まれていると考えられる。以上より初めに 60 次元の離散値状態方程式を作り、可制御行列 V による VV' の固有値を求めるところ 2 のようになる。（ただし、31番目以上は 5 の倍数

表 1 重み系列 g_i

i	g_i		i	g_i	
	中部地域系統	九州地域系統		中部地域系統	九州地域系統
0	0.0	0.0	31	-0.004896	0.007444
1	0.071023	0.040000	32	-0.012857	0.007066
2	0.093298	0.069200	33	-0.014351	0.004649
3	0.055193	0.096596	34	-0.012814	-0.009596
4	0.049010	0.110505	35	-0.007841	-0.005416
5	0.046210	0.096343	36	-0.010013	-0.005206
6	0.051182	0.094504	37	-0.020956	-0.002742
7	0.048393	0.072343	38	-0.012057	-0.006648
8	0.031167	0.072936	39	-0.021834	-0.016872
9	0.019544	0.065514	40	-0.014708	-0.020066
10	0.026329	0.054470	41	-0.008379	-0.022083
11	0.041209	0.049703	42	-0.011533	-0.016124
12	0.034990	0.038766	43	-0.020566	-0.015029
13	0.021544	0.037440	44	-0.012587	-0.016814
14	0.010358	0.055201	45	-0.008305	-0.020764
15	0.003971	0.026404	46	-0.004885	-0.021661
16	0.010473	0.018629	47	-0.005628	-0.016278
17	0.011578	0.016985	48	-0.003063	-0.014980
18	0.014499	0.015818	49	-0.005148	-0.017825
19	0.007534	0.014483	50	-0.007879	-0.013224
20	-0.001322	0.020272	51	0.003222	-0.013219
21	0.007753	0.031374	52	0.000897	-0.017858
22	0.006263	0.019408	53	0.000793	-0.022259
23	0.014592	0.016546	54	0.002399	-0.015753
24	0.019252	0.023457	55	0.004358	-0.017190
25	0.008282	0.016831	56	0.006321	-0.016027
26	0.004160	0.012055	57	0.007968	-0.012802
27	0.001418	0.011870	58	0.003931	-0.007020
28	0.004474	0.007112	59	-0.000131	-0.012960
29	0.005431	0.005125	60	-0.000310	-0.006052
30	0.000479	0.006878			

表 2 固有値 λ_i

i	λ_i	
	中部地域系統	九州地域系統
1	0.192048	0.624299
2	0.364365E-01	0.112301
3	0.208927E-01	0.301131E-01
4	0.112191E-01	0.199364E-01
5	0.972636E-02	0.677684E-02
6	0.830327E-02	0.296955E-02
7	0.275019E-02	0.281400E-02
8	0.218185E-02	0.254485E-02
9	0.145575E-02	0.241096E-02
10	0.131851E-02	0.152084E-02
11	0.123196E-02	0.137915E-02
12	0.826426E-03	0.127320E-02
13	0.805755E-03	0.126588E-02
14	0.762816E-03	0.119353E-02
15	0.712881E-03	0.115553E-02
16	0.579569E-03	0.100380E-02
17	0.575101E-03	0.100239E-02
18	0.503009E-03	0.981286E-03
19	0.495562E-03	0.760212E-03
20	0.460681E-03	0.628413E-03
21	0.442236E-03	0.590017E-03
22	0.430474E-03	0.402815E-03
23	0.404915E-03	0.401007E-03
24	0.290265E-03	0.384986E-03
25	0.281180E-03	0.346937E-03
26	0.270865E-03	0.357117E-03
27	0.240629E-03	0.311685E-03
28	0.234183E-03	0.254431E-03
29	0.229674E-03	0.240945E-03
30	0.224011E-03	0.233110E-03
35	0.129511E-03	0.116228E-03
40	0.696146E-04	0.909000E-04
45	0.467370E-05	0.197988E-04
50	0.845806E-06	0.223668E-05
55	0.196470E-09	0.664709E-07
60	0.496787E-10	0.164837E-09

順位のみ示す

主要な固有値として大小の順に選び、対応する固有ベクトルから 2 次元および 5 次元の離散値状態方程式モデルを求めるところ次式のようになる。

i) 中部地域系統

(2次元)

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \begin{pmatrix} 0.909854 & 0.915556E-01 \\ -0.398766E-01 & 0.982888 \end{pmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{pmatrix} 0.178949 \\ 0.227865E-01 \end{pmatrix} \Delta p(k) \\ \Delta f(k) &= (0.408344 \quad -0.119372) \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (18)$$

(5次元)

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \begin{pmatrix} 0.909854 & 0.915556E-01 & 0.935562E-01 & -0.100926 & -0.118890 \\ -0.398766E-01 & 0.982888 & -0.131354 & 0.178735E-01 & 0.512409E-01 \\ 0.308506E-01 & 0.994658E-01 & 0.929824 & 0.165067 & 0.106321 \\ 0.243878E-01 & 0.992106E-02 & -0.120964 & 0.876160 & -0.396802 \\ -0.267567E-01 & -0.264753E-01 & 0.725413E-01 & 0.369472 & 0.437621 \end{pmatrix} \\ &\cdot \mathbf{x}(k) + \begin{pmatrix} 0.178949 \\ 0.227865E-01 \\ -0.388135E-01 \\ -0.193386E-01 \\ 0.267925E-01 \end{pmatrix} \Delta p(k) \\ \Delta f(k) &= (0.408344 \quad -0.119372 \quad -0.268524 \quad 0.182552 \quad 0.271675) \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (19)$$

ii) 九州地域系統

(2次元)

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \begin{pmatrix} 0.938458 & 0.103203 \\ -0.437797E-01 & 0.979856 \end{pmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{pmatrix} 0.268711 \\ 0.549470E-01 \end{pmatrix} \Delta p(k) \\ \Delta f(k) &= (0.340090 \quad -0.163961) \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (20)$$

(5次元)

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \begin{pmatrix} 0.938458 & 0.103203 & -0.498401E-01 & -0.187105 & 0.181680 \\ -0.437797E-01 & 0.979856 & 0.488655E-01 & 0.691365E-01 & -0.950198E-01 \\ -0.109381E-01 & -0.253048E-01 & 0.963128 & -0.254979 & 0.644555E-01 \\ 0.334323E-01 & 0.291291E-01 & 0.207487 & 0.811701 & 0.252984 \\ -0.189396E-01 & -0.233414E-01 & -0.306041E-01 & 0.147506 & 0.742626 \end{pmatrix} \\ &\cdot \mathbf{x}(k) + \begin{pmatrix} 0.268711 \\ 0.549470E-01 \\ 0.265357E-01 \\ -0.632215E-01 \\ 0.411827E-01 \end{pmatrix} \Delta p(k) \\ \Delta f(k) &= (0.340090 \quad -0.163961 \quad 0.152860 \quad 0.447775 \quad -0.500275) \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (21)$$

以上において2次元のモデルは図4のような物理的考察によるモデルに対応し、5次元のモデルは系統内が大きく2つの部分系統に分けることができると仮定される場合には図3のようなモデルに対応する。

6.3 実測データとの比較

実測された連系線潮流変動量と負荷遮断電力量から系統内の需給不平衡量を求め、それを前節で求めた離散値系モデルに加えて推定周波数変動を算定し、同時に実測された周波数変動との比較を行なうと図6-a, bおよび図7-a, b のようになる。

この結果より次のようなことがわかる。

(a) 系統のモデル化において、モデルの次元を高くすることによって精密なモデル化ができる。

(b) 可制御行列による VV' の固有値 λ_i において最大固有値に対する比が著しく変化する次元のモデルを考えると、このとき推定周波数と実測周波数はよく一致する。これよりモデル化の次元を決定することができる。特に実測データに関しては2次元の離散値系モデルによって十分に電力系統をモデル化していることがわかる。

6.4 系統定数の算定

2次元の離散値状態方程式モデルと入出力等価なパ

表 3 零点および極

	中部地域系統	九州地域系統
s_0	0.96150	0.93756
s_p^+	$0.94637 \pm j0.04814$	$0.95916 \pm j0.06396$
k_p	0.522	0.893

表 4 系統定数

	中部地域系統	九州地域系統
K_L	0.93941	0.17452
K_G	0.97788	0.94493
T_s	2.74717	2.40929
T_G	5.09351	3.10186

単位 k_L, k_G (100MW/0.1Hz) T_s, T_G (s)

ルス伝達関数はそれぞれ次式のようになる。

i) 中部地域系統

$$G(z) = \frac{0.07035z - 0.06764}{z^2 - 1.89274z + 0.89794} \quad (22)$$

ii) 九州地域系統

$$G(z) = \frac{0.08238z - 0.07723}{z^2 - 1.91831z + 0.92407} \quad (23)$$

これより零点、極および定常値は表3のようになる。

この値より第5章の手法によって特性定数を算定すると、表4のように求められる。

これらの値から九州地域系統に関しては(5)式が成り立っているが、中部地域系統の場合には成り立っていないことがわかる。さらに以上の値は従来より予想されていた値の範囲にある³⁾。

7. あとがき

電力系統において比較的単純な入出力波形が与えられている場合、それを離散化することによって離散値状態方程式としてモデル化することができる。従来、物理的な考察からモデル化を行なう場合最終的な係数の調整には試行錯誤的な面がみられ、ある程度の不確実さが残るものと考えられるが、本手法によればほぼ出力の一一致するしかも実測データのみのモデル構成を行なうことができ、短時間のうちに各特性定数を算定することができる。

付録

$G(s)$ からの系統定数 T_s, T_G, K_L, K_G の計算は

$$G(s) = \frac{s - s_0}{(s - s_p^+)(s - s_p^-)} \cdot \left(-\frac{s_p^+ s_p^-}{s_0} \right) \cdot k_p$$

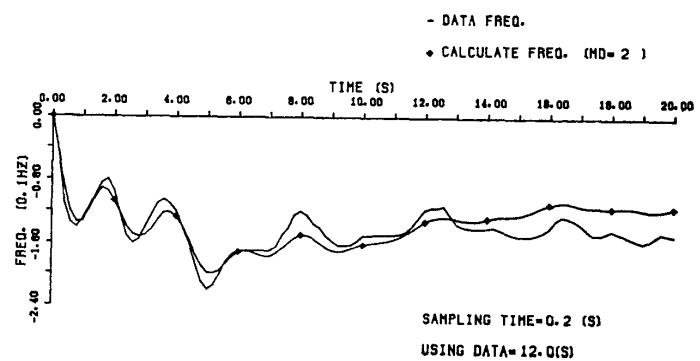


図 6-a 周波数変動 (2 次元)

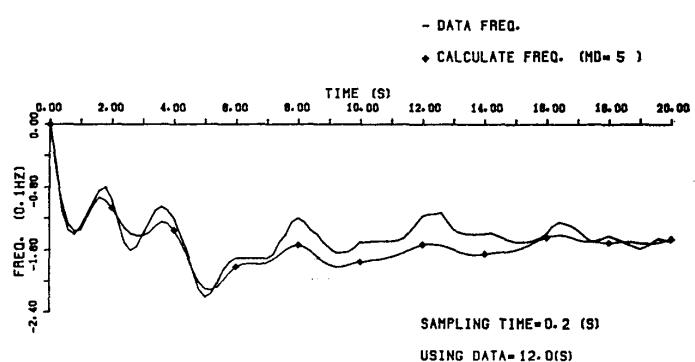


図 6-b 周波数変動 (5 次元)

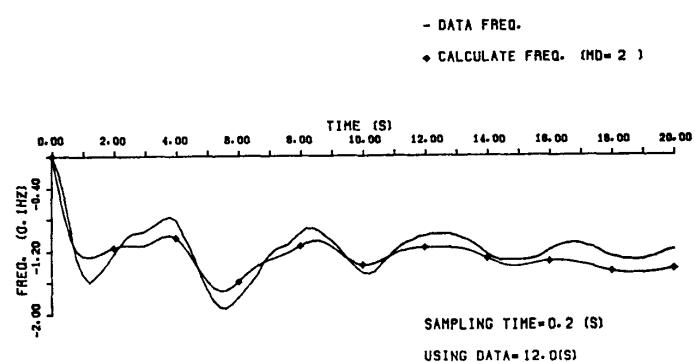


図 7-a 周波数変動 (2 次元)

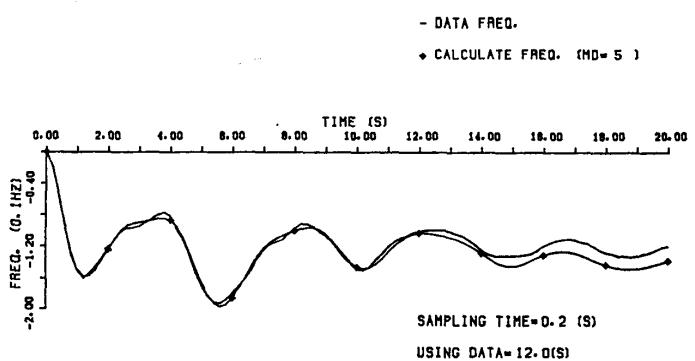


図 7-b 周波数変動 (5 次元)

から

$$T_s = -\frac{1}{k_p} \cdot \frac{s_0}{s_p^+ s_p^-} \quad (\text{付 } 1)$$

$$T_g = -\frac{1}{s_0} \quad (\text{付 } 2)$$

$$K_L = \frac{s_0(s_p^+ + s_p^- - s_0)}{k_p s_p^+ s_p^-} \quad (\text{付 } 3)$$

$$K_G = \frac{1}{k_p} - \frac{s_0(s_p^+ + s_p^- - s_0)}{k_p s_p^+ s_p^-} \quad (\text{付 } 4)$$

として求めることができる。

参考文献

- 1) Oll I. Elgerd : Electric Energy System Theory, McGraw-Hill (1971)
 - 2) 小野・高山・都築：実測データによる電力系統特性解析（I），第8回システムシンポジウム（1982）
 - 3) 関根：電力系統工学，電気書院（1976）
 - 4) 小野・都築：漸近展開に基づく制御系モデルの簡易構成，第12回制御理論シンポジウム（1983）
 - 5) 小野・高山・都築：入出力データに基づく電力系統動特性の簡易推定，第3回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス（1983）
 - 6) 田村：解析函数 64/69 裳華房（1962）
 - 7) 中地域技術研究連絡会・西日本研究連絡会：電力系統特性の実測と解析（1975）
-