



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	電力系統における負荷周波数制御への線形状態フィードバックの適用
Author(s)	諸住, 哲; Morozumi, Satoshi; 田中, 英一 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 100, 33-43
Issue Date	1980-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41634
Type	departmental bulletin paper
File Information	100_33-44.pdf



電力系統における負荷周波数制御への 線形状態フィードバックの適用

諸住 哲* 田中英一* 長谷川 淳* 藤原 一*

(昭和55年6月30日受理)

An Application of Linear State Feedback to Load Frequency Control of Electric Power Systems

Satoshi MOROZUMI, Eiichi TANAKA, Jun HASEGAWA

and Hajime FUJIWARA

(Received June 30, 1980)

Abstract

The load frequency control (LFC) of a multi-area interconnected power system is studied. The conventional controller (tie-line load bias control; TBC) has some undesirable characteristics. In order to improve on these characteristics, a new control strategy is proposed.

The oscillatory response of the TBC system, which affects the tie-line power flow and the behaviour of the LFC governing station, is one of undesirable characteristics. Recently many control strategies have been proposed to improve these characteristics. However, most of them are too complex for practical use.

The controller proposed here consists of TBC and feedback control from only three state variables (namely, an incremental frequency deviation, an incremental change in governor valve position and an incremental generation change) via gain amplifiers in each control area. To run a comparison of the proposed controller against others, simulation of the closed-loop system has been carried out not only for the step load change, but also for different types of the load change, and it was clearly shown that the controller is highly effective. Furthermore, the desirable value of the frequency bias is discussed based on stability and security of the system.

1. 緒 言

電力系統における負荷周波数制御 (LFC) は、周波数偏倚連系線負荷制御 (TBC) 等の制御方式によって、周波数に関する限り、今日まで十分な効果を挙げてきた。しかし近年、電力系統が大規模化するに伴い、次のような問題が表面化してきた。

- (1) 連系線潮流の常時変動が大きく、負荷急変時に潮流の荒れが目立つ。
- (2) LFC 用発電所の動作が、制御の仕上りに比べて頻繁すぎ、逆動作の傾向が一部に見られる。

これらの問題を解決する方法として、1970年に Elgerd 氏らが、LFC に最適制御理論を導入す

* 電気工学科 電力工学講座

ることを提唱¹⁾した。それ以後、LFCにおける最適制御理論の適用に関する数多くの研究がなされてきた^{2,3,4)}。しかし、これらは、計算アルゴリズムの複雑さ、扱う情報伝達量の多さ、制御の即時性など、それぞれに問題点があり、TBC等の既設の制御方式に代って実用化されるには至っていない。だが、最近、TBCに最適制御理論を用いた線形フィードバック系を組合せる手法が提案された⁵⁾。

筆者等は、モデルによるシミュレーションの結果から、TBCの持つ固有の欠点を指摘し、さらに、その欠点を補うように、ガバナバルブ位置、発電機出力、周波数からの情報のみを扱った最も簡単な形での最適制御理論に基づいた線形フィードバックを加えることにより、現在のLFCにおける問題を解決することが可能であることを示す。

2. システムのモデルおよび制御系のモデル

2.1 システムのモデル

本報告で検討する電力システムは、図1で示された2地域電力システムとする。このモデルでは、両地域のシステムの大きさ(系統容量)が等しく、各パラメータの値も全く同じであると仮定している。

$$P_{r1} = P_{r2} = 2000 \text{ (MW)}$$

$$M_1 = M_2 = 0.166 \text{ (puMW} \cdot \text{sec/Hz)}$$

$$D_1 = D_2 = 0.00833 \text{ (puMW} \cdot \text{Hz)}$$

$$T_{l1} = T_{l2} = 0.3 \text{ (sec)}$$

$$T_{gv1} = T_{gv2} = 0.08 \text{ (sec)}$$

$$R_1 = R_2 = 2.4 \text{ (Hz/puMW)}$$

$$P_{tie\ max} = 200 \text{ (MW)}$$

$$\delta_1^* - \delta_2^* = 30 \text{ (deg)}$$

$$T_{12} = 0.545 \text{ (puMW)}$$

$$F^* = 60 \text{ (Hz)}$$

$$a_{12} = -1.0$$

2.2 制御系のモデル

本報告で検討する制御系は、以下の3種類で、便宜上、それぞれを、case 1, case 2, case 3とする。

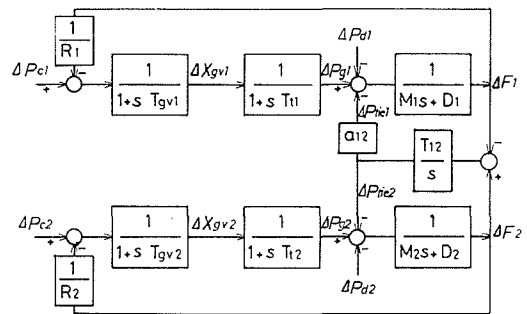
(1) case 1 TBC

TBCは、周波数の偏差 ΔF と連系線潮流の偏差 ΔP_{tie} の線形結合の積分値を制御入力とする方法であり、一般に、積分ゲイン K_I 、周波数バイアス B を変えることにより特性が変わる。地域 i の制御入力 ΔP_{ci} は、次式で表わされる。

$$\Delta P_{ci} = -K_I \int (\Delta P_{tiei} + B_i \cdot \Delta F_i) dt \quad (1)$$

ここで、添字 i は地域 i の変数であることを表わす。周波数バイアス B_i は、(2)式で表わされる。ここで、 d_i は任意の正の定数、 β_i は地域周波数応答特性(AFRC)と呼ばれる数値である。

$$B_i = d_i \cdot \beta_i \quad (\text{puMW/Hz}) \quad (2)$$



但し、各変数およびパラメータは次の通りである。
 ΔF : 周波数偏差, ΔP_{tie} : 連系線潮流の偏差, ΔP_d : 負荷変動, ΔP_g : 発電機出力変化, ΔX_{gv} : ガバナ位置変化, ΔP_c : 変速器位置変化, P_r : 系統定格容量, M : 慣性定数, D : 負荷ダンピング係数, T_l : タービン時定数, R : 調定率, $P_{tie\ max}$: 最大連系線潮流, T_{12} : 同期化力, F^* : 定格周波数, a_{12} : 系統容量換算係数, δ : 電力角, なお添字 $1, 2$ は、地域の番号を表わす。

図-1 2地域電力システムのブロック線図

$$\beta_i = D_i + \frac{1}{R_i} \quad (\text{puMW/Hz}) \quad (3)$$

2.1 で述べた系統では、 $\beta_1 = \beta_2 = 0.425$ となる。一方、乗数 d_i は、現在 1.0 に近い値あるいは、最適値といわれている 0.5⁶⁾ に近い値が用いられている。本報告では、積分ゲイン K_{1i} をすべて 1.0 に設定し、乗数 d_i すなわち周波数バイアス B_i を変えることにより応答がどのように変化するかを各制御方式において検討した。

(2) case 2 TBC と一括計算形最適線形フィードバックとの組合せ

図 1 のモデル系統において、次のような状態変数、入力変数を定義する。

$$\mathbf{x}' = [\Delta F_1 \ \Delta P_{g1} \ \Delta X_{gv1} \ \Delta P_{tie2} \ \Delta F_2 \ \Delta P_{g2} \ \Delta X_{gv2}] \quad (4)$$

$$\mathbf{u}' = [\Delta P_{c1} \ \Delta P_{c2}] \quad (5)$$

なお、太字は行列あるいはベクトルを表わし、記号 ' は転置、 $^{-1}$ は逆行列、 $\dot{\cdot}$ は微分を表わす。

(4)、(5) に基づいて、状態方程式 (6) を書けば行列 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} は以下のようになる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -D_1/M_1 & 1/M_1 & 0 & -a_{12}/M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{t1} & 1/T_{t1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/T_{gv1}R_1 & 0 & -1/T_{gv1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -T_{12}^* & 0 & 0 & 0 & T_{12}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/M_2 & -D_2/M_2 & 1/M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{t2} & 1/T_{t2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{gv2}R_2 & 0 & -1/T_{gv2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1/T_{gv1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_{gv2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

この時、(9) 式の評価関数を最小にする最適制御入力 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ は、(10) 式の形で表わされる。

ここで、 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} は正定な重み行列である。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\mathbf{x}'\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}'\mathbf{R}\mathbf{u}] dt \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}'\mathbf{P}\mathbf{x} \quad (10)$$

ただし、 \mathbf{P} は、内部状態が 7 次の場合、7 行 7 列の行列で、Riccati 方程式 (11) の正定解である。

$$\mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}'\mathbf{P} + \mathbf{A}'\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (11)$$

なお、重み行列 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} は、本報告では、次のように定義した。 q 、 r は任意の正の定数である。

$$\mathbf{Q} = q\mathbf{I} \quad (7 \text{ 行 } 7 \text{ 列}) \quad (12)$$

$$\mathbf{R} = r\mathbf{I} \quad (2 \text{ 行 } 2 \text{ 列}) \quad (13)$$

(10) 式で表現されたフィードバック系は、状態変数にゲインをかけてフィードバックしているだけであるので、ステップ負荷変動に対して ΔF_1 、 ΔF_2 、 ΔP_{tie1} などの制御量の定常偏差を 0 にすることはできない。しかも、無制御の場合 (ガバナフリー運転) と比べて、逆に定常偏差が大きくなる。しかし、この線形フィードバック系を TBC と組合せすることにより、TBC の欠点を補うことが期待できる。この場合、最良の結果が得られたのは、(12)、(13) 式の q 、 r の値を 1:1 ないしは、それに近い比に選んだ時である。そこで、本報告では、 $q:r$ を 1:1 に決め、TBC 側のバイアスの係数 d_i は特に限定せず、case 1 と同様に、パラメータとして扱った。なお、case 2 において、線形フィードバックのゲイン行列 \mathbf{K} は、次のような値に計算された。

$$K = \begin{pmatrix} 0.621 & 1.258 & 0.634 & 1.020 & 0.025 & 0.002 & 0.003 \\ 0.025 & 0.002 & 0.0003 & -1.020 & 0.621 & 1.258 & 0.634 \end{pmatrix} \quad (14)$$

(3) case 3 TBC と地域分割形線形フィードバックとの組合せ

この制御方式は、TBC に線形フィードバック系を組合せて、応答を改善する点では case 2 と同様である。しかし、線形フィードバックのゲインを求める最適制御理論の適用は、最も簡単な形、つまり、各地域において、(15)、(16) の状態変数、入力変数を決め、 ΔP_{tiei} は、 ΔP_{di} 同様に、外乱と考えて線形フィードバックゲインの計算を行なうという手法である。したがって、この手法における各地域の状態変数および制御入力は、

$$\mathbf{x}'_i = [\Delta F_i \quad \Delta P_{gi} \quad \Delta X_{gvi}] \quad (15)$$

$$u_i = \Delta P_{ci} \quad (16)$$

となる。また、行列 A_i 、 B_i は以下のように記述される。

$$A_i = \begin{pmatrix} -D_i/M_i & 1/M_i & 0 \\ 0 & -1/T_{ti} & 1/T_{ti} \\ -1/T_{gvi}R_i & 0 & -1/T_{gvi} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$B_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1/T_{gvi} \end{pmatrix} \quad (18)$$

case 2 と同じ理由により、 $q:r=1:1$ と定め、各地域における最適フィードバックゲインは次のように計算された。

$$K_i = [0.646 \quad 1.260 \quad 0.635] \quad (19)$$

これを、case 2 の時のように、全系のゲイン行列に直せば次のようになる。

$$K = \begin{pmatrix} 0.646 & 1.260 & 0.635 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.646 & 1.260 & 0.635 \end{pmatrix} \quad (20)$$

(20) と (14) を比較すると、(20) は他地域からの情報と連系線に関する情報が全く無い形と考えれば良い。case 3 の線形フィードバック系は、case 2 と比較して、計算量および扱う情報量が大幅に少なくなるが、このような省略が制御の仕上りにどう影響するかという点についても検討した。

3. ステップ応答による比較・検討

制御系に、 $\Delta P_{d1}=0.01$ (puMW) のステップ負荷変動を与えて、その応答波形を比較して評価する方法、あるいは、評価関数として偏差の二乗積分値を用いる方法が、LFC の研究では、一般に用いられている。本報告でも、case 1～case 3 の制御方式を比較し、さらに、最適な周波数バイアスを選ぶため、まず最初にステップ負荷変動に対する応答を調べた。

3.1 ステップ応答波形による制御方式の比較

図2は case 1 の制御方式でバイアス係数 d_i を 0.5 とした場合のステップ負荷変動に対する応答、また、図3～5は case 1～case 3 の各制御方式においてバイアス係数 d_i を 1.0 とした場合のステップ負荷変動に対する応答である。case 1 の応答は、 $d_i=1.0$ の場合のみならず最適値と言われる $d_i=0.5$ の場合もきわめて振動的である。これは、周波数偏差、連系線潮流偏差から積分器を通してフィードバックを行っただけでは、閉ループ系の固有値の中に実数部が虚軸に近く虚数部が大きいものが残ってしまい、これが系の応答を支配しているためである。この固有値は、バイアスを大きくすると、複素平面上を右へ移動し、 d_i が 1.5 を越えるあたりから不

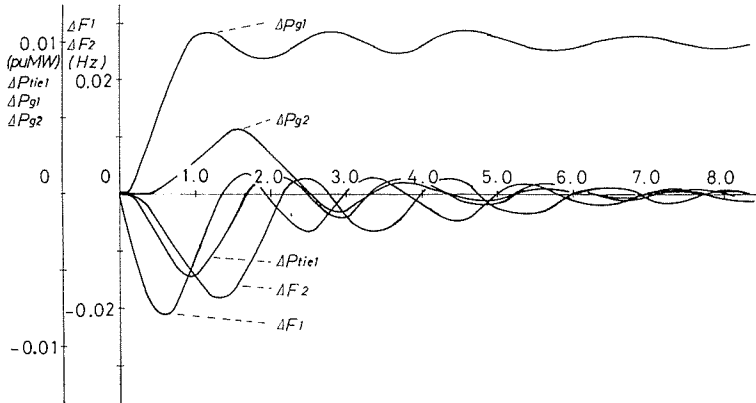


図2 case 1 ($d_i=0.5$) の場合の各状態のステップ応答

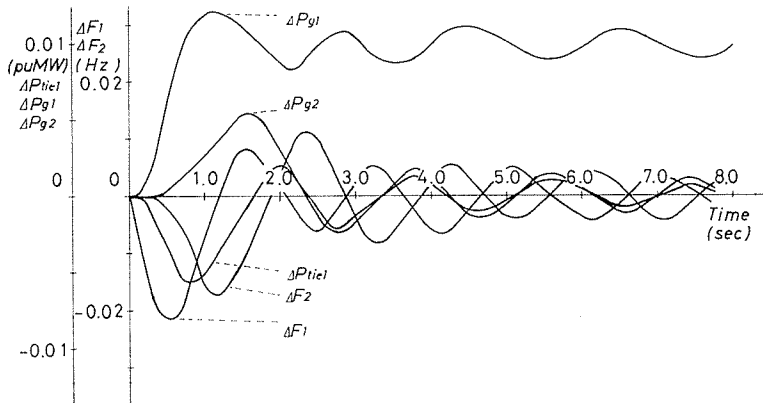


図3 case 1 ($d_i=1.0$) の場合の各状態のステップ応答

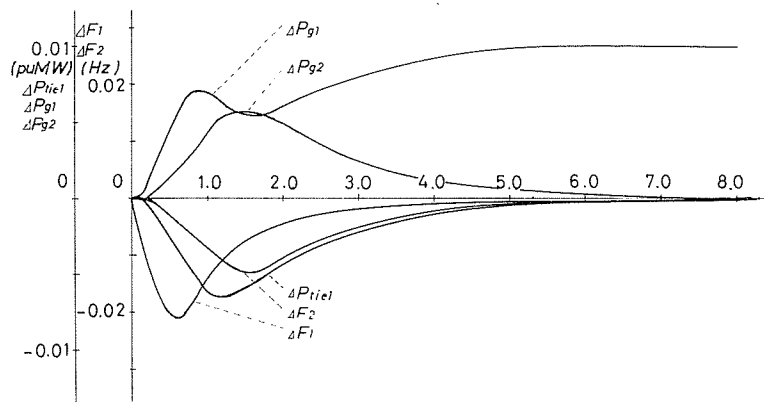


図4 case 2 ($d_i=1.0$) の場合の各状態のステップ応答

安定領域である右半面に入り系は不安点になる。case 2 および case 3 では、この点が改善されている。case 2 ($d_i=1.0$) では、振動はほとんど無い。case 3 ($d_i=1.0$) では、若干、振動が残っているが、case 2 ($d_i=1.0$) に比べて各変数の最大偏差は小さいという結果を得た。なお、表 1 は、ここで比較した 4 つの例と、2.1 で述べたモデル系統の無制御状態（ガバナフリー運転）の

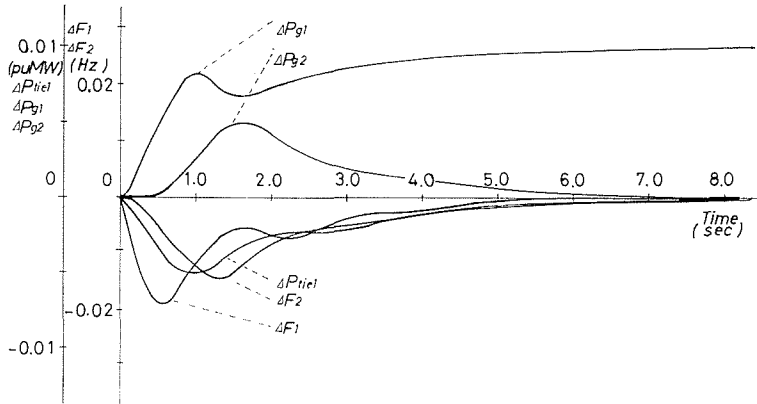


図5 case 3 ($d_i=1.0$) の場合の各状態のステップ応答

表1 各制御方式における固有値

モデル系統(無制御)	case 1 ($d_i=0.5$)	case 1 ($d_i=1.0$)	case 2 ($d_i=1.0$)	case 3 ($d_i=1.0$)
-13.3	-13.3	-13.2	-17.8	-17.8
-13.3	-13.3	-13.2	-17.8	-17.8
$-0.50 \pm j 3.52$	$-0.32 \pm j 3.30$	$-0.15 \pm j 3.35$	$-1.70 \pm j 2.88$	$-1.02 \pm j 3.28$
$-1.30 \pm j 2.51$	$-1.00 \pm j 2.34$	$-0.62 \pm j 2.30$	$-2.76 \pm j 2.15$	$-2.76 \pm j 2.15$
-1.62	$-1.00 \pm j 0.94$	$-1.18 \pm j 0.67$	-0.73	-0.49
	-0.62	-1.41	-0.49	-0.36
			-1.86	-3.61

時の固有値である。

3.2 評価関数による比較とバイアスの決定

ここで用いる評価関数は、(9)式で示される評価関数よりも簡単な形のもので、周波数偏差の二乗積分の形のもの、速系線潮流偏差の二乗積分の形のものとの2種類である。

$$J_f = \int_0^T (\Delta F_1)^2 dt \quad (21)$$

$$J_b = \int_0^T (\Delta P_{tie1})^2 dt \quad (22)$$

ステップ応答の場合、安定であれば case 1 ~ case 3 の各制御方式では両変数 ΔF_1 、 ΔP_{tie1} とも定常的に0になるので、評価関数 J_f 、 J_b は無有限時間後には、ある有限値に収束する。図6、図7は、これらの評価関数の収束値と、バイアス係数 d_i の関係を示したものである。

Elgerd 氏らが、TBC の最適バイアス値を求めた方法⁹⁾は、この手法とほぼ同じもので、本報告においては case 1 に相当する。同様に、この手法を case 2, case 3 にも適用した。その結果、case 2, case 3 とも、case 1 に比べてかなり大きいバイアス値において J_f 、 J_b 最小の点を持ち、全般的に、case 2 と case 3 は似た特性を示しているが、 $d_i=8.0$ 付近までは、case 3 の方が、case 2 よりも J_f 、 J_b の値は若干小さく、 $d_i=8.0$ を越えると、逆に、case 3 の安定性が case 2 に比べて悪くなり、 J_f 、 J_b の値の大小は逆転している。

図6、図7により、case 2, case 3 では、case 1 に比べてかなり広範囲でバイアスを設定できることがわかるが、case 2, case 3 では、どの値のバイアスが最適であるかを決定する場合、図6、図7において、単純に評価関数最小の点を最適バイアス係数とするわけにはいかない。そ

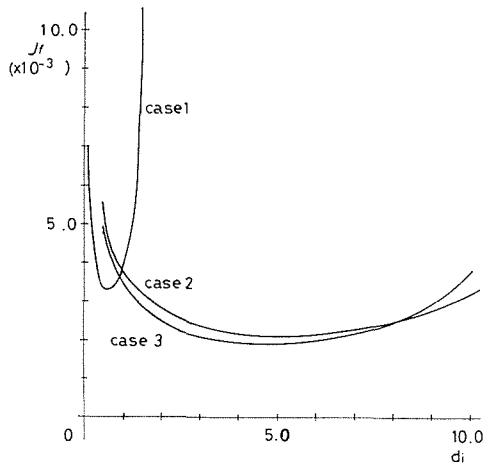


図6 評価関数 J_f とバイアス係数 d_i の関係 (ステップ応答)

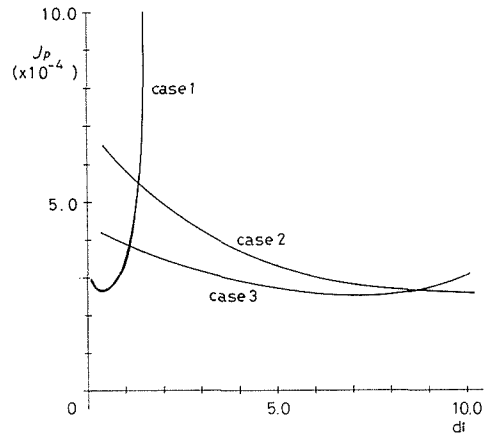


図7 評価関数 J_p とバイアス係数 d_i の関係 (ステップ応答)

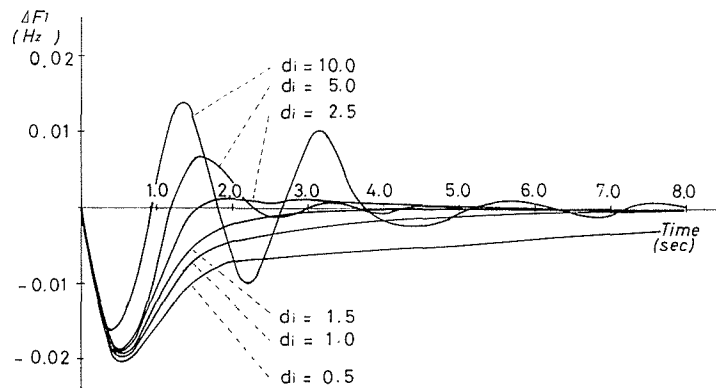


図8 バイアス係数 d_i の変化による ΔF_1 のステップ応答のちがひ (case 2)

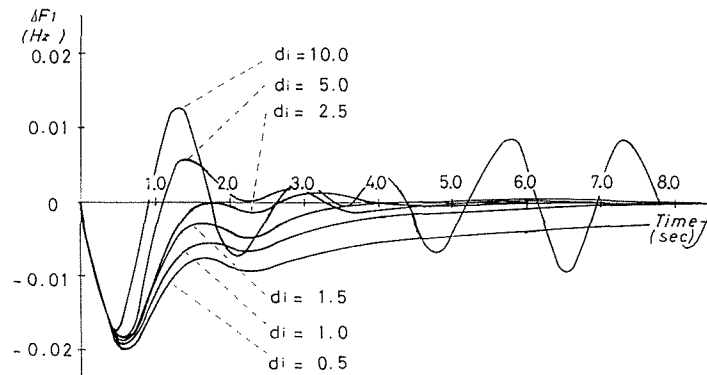


図9 バイアス係数 d_i の変化による ΔF_1 のステップ応答のちがひ (case 2)

の理由は J_f の最小, J_p の最小を示す d_i が一致しないためだけではない。図8～図11は、case 2, case 3において、バイアス係数 d_i を変えた時の、周波数偏差および連系線潮流偏差の応答波形のちがいを図にしたものであるが、必ずしも評価関数最小の場合に最良な応答波形が得

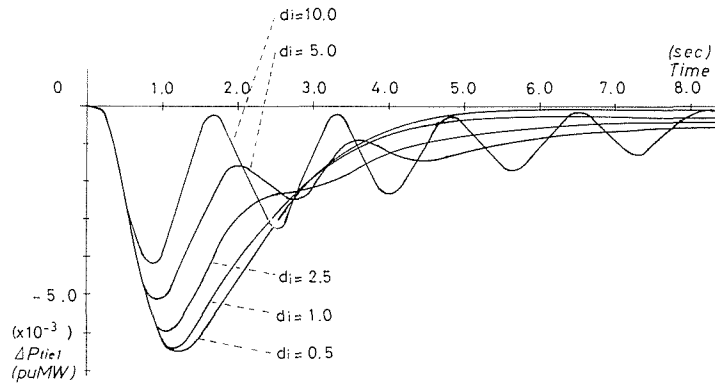


図10 バイアス係数 d_i の変化による ΔP_{tie1} のステップ応答のちがひ (case 2)

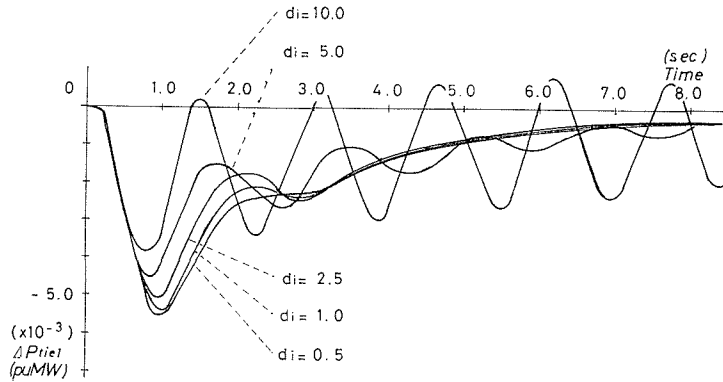


図11 バイアス係数 d_i の変化による ΔP_{tie1} のステップ応答のちがひ (case 3)

られていないことがわかる。これは、系全体が7次という高次の系であるので、偏差の二乗積分の形の評価関数では、評価関数最小の点での応答波形は振動的になりやすいためである。図8、図9の形から最適なバイアス値を推定すれば、case 2, case 3とも、 $d_i=2.5$ 付近の値である。

case 2, case 3において $d_i=2.5$ のようなバイアス値を採用することには、まだ問題がある。通常では、かなり仕上りの良い制御が期待できるのであるが、たとえば、事故等により線形フィードバック系の情報が途絶え、しかも、一方では TBC が健全であるならば、制御系は case 1で $d_i=2.5$ と設定した場合と同じ状況になり不安定となるからである。この危険を避けるためには、TBC 側のバイアスを $d_i=1.5$ より小さく抑えることが考えられる。 d_i を 1.5 より小さくしても、 $d_i=2.5$ とした場合に比べて、制御の仕上りは、連系線潮流の面ではあまり悪化せず、周波数の面では、多少悪化するとはいえ、まだ case 1 の場合と比較してもかなり良い制御の仕上りを見せている。

4. その他の形の負荷変動に対する特性

4.1 正弦波状負荷変動に対する特性

モデル系統の地域1において、

$$\Delta P_{d1} = 0.01 \sin(2\pi/T)t \quad (\text{puMW}) \quad (23)$$

なる正弦波状負荷変動が起った場合、case 1～case 3において、各変数がどのような定常振動の振幅を持つかを調べた。ここで、 T は正弦波状変動の周期を表わし、 t は時間を表わしてい

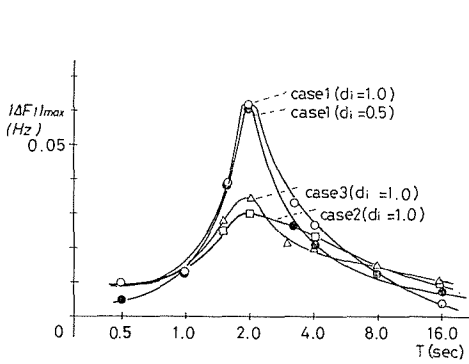


図12 正波状負荷に対する特性 ΔF_1

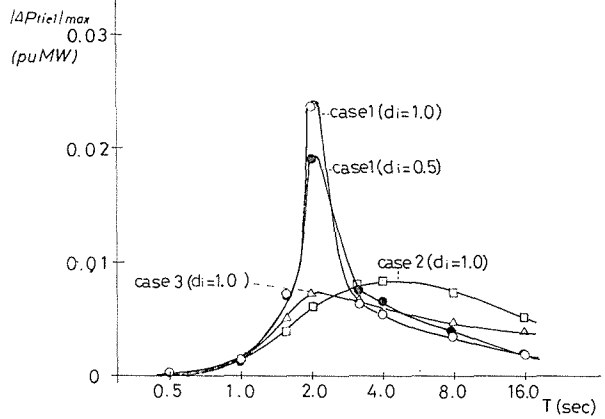


図13 正波状負荷変動に対する特性 ΔP_{tie1}

る。図12, 図13は横軸に振動周期, 縦軸に周波数偏差あるいは連系線潮流偏差の定常振動の振幅をとって, 曲線を描いたものである。ここで注目すべきことは, 虚軸にきわめて近い固有値を持つ case 1, すなわち TBC は, その固有値の虚数部の値に対応する周期の振動に対してきわめて敏感なことであり, またその特徴は, ΔF_1 の応答よりも, ΔP_{tie1} の応答により強く現れていることである。この周期は, 当然, ステップ応答で表われた振動の周期と同じである。case 1 のこの特徴は, 近年 LFC において表面化してきた問題の根源であり, 特に連系線潮流の面で問題にされてきた理由は, 上記の特徴のためと言えるだろう。一方, case 3 では, 共振性はかなり抑えられている。case 2 は, case 1, case 3 の共振周期近くでは, 振幅は他に比べて最小である。しかし, 特に連系線潮流の面で, それより長い周期においては, 逆に他に比べて振幅が大きい。

4.2 ランダムな負荷変動に対する特性

負荷変動の平均を0とし, それを中心に, 負荷が細かくランダムに変動している場合には, ΔF , ΔP_{tie} はできるだけ0に近いことが望ましい。ここでは, モデル系統の地域1に, 平均が0, 標準偏差が0.01 (puMW) のランダムな負荷変動が, 0.05秒おきの短い間隔で起った場合の特性を比較する。具体的な比較の基準として (21), (22)式の評価関数を用いた。図14は, 各 case における J_b の値の時間的推移である。ここでは, 4.1で述べた特徴が反映されており, case 1の線図で傾斜の急な部分は, 図12, 図13で見られた共振周期で応答が共振している部分である。また, ステップ応答では, case 2より振動的であった case 3が, 逆に case 2より成績が良いのは, 4.1の最後で述べた理由によるものと思われる。

一方, バイアスとの関係を調べたのが, 図15, 図16で, 縦軸は, それぞれ単位時間の各評価関数の平均増加率を表わしている。case 2, case 3に関しては, 特に周波数偏差の面でバイアスを大きくするほど, 細かいラ

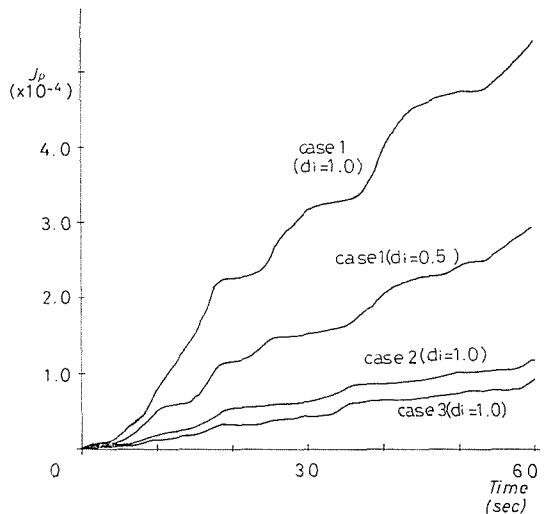


図14 ランダム負荷変動に対する評価関数 J_b の推移

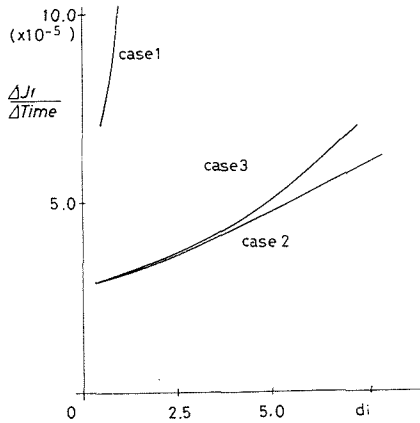


図 15 バイアス係数 d_i とランダム負荷に対する J_f の平均増加率

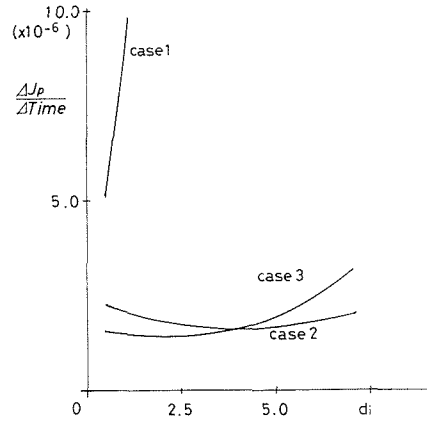


図 16 バイアス係数 d_i とランダム負荷に対する J_p の平均増加率

ンダム変動に対して特性が悪くなることを示している。

4.3 ランプ負荷変動に対する特性

連続的な負荷増加に対する追従性を見るため、地域 1 に、10 秒間に 0.01 (puMW) の割合で連続的に負荷が増加した場合の ΔF_1 の定常偏差を調べた。図 17 が示すように、どの場合もバイアスが大きいくほど追従性は良い。また、case 2 と case 3 は全く同じ特性を示し、case 1 より追従性が劣ることがわかった。しかし、case 2, case 3 で $d_i=1.0$ とした場合、0.02 (Hz) の定常偏差が残るランプ負荷は、約 1.5 秒に 0.01 (puMW) の割合で変化することになる。実際問題として、このような変動が定常的に続くことは考えられない。急な変動に対しては、ステップ負荷変動を想定した方が適当であると思われる、ランプ負荷に対する特性は、ステップ負荷に対する特性よりも重要性が少ないと考えられる。

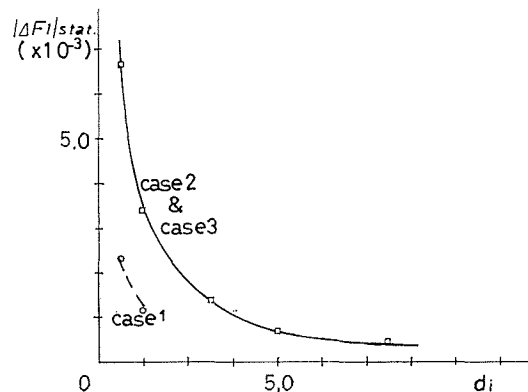


図 17 (0.01 puMW/10 sec) のランプ負荷変動時の $|\Delta F_1|_{stat.}$ 定常偏差と d_i の関係

5. 結 言

3 および 4 で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) TBC は、ある特定の負荷変動周期に対して共振を起しやすい欠点を持つが、状態変数からの簡単なフィードバックを加えることにより、著しく改善される。
- (2) case 3 のような、連系線潮流を状態変数として扱わないフィードバック系を TBC に加える方法でも、case 2 のように状態変数として扱った場合に比較して、様々な負荷変動に対する応答は劣らない。
- (3) case 2, case 3 のように、状態変数からのフィードバックを TBC に組合せた時、TBC 側のバイアスは、TBC だけの時よりも、広い範囲で選択できる。本報告で扱った系統では、最適なバイアスは $d_i=2.5$ 付近であったが、TBC の安定限界 $d_i=1.5$ より小さな

バイアスでも十分に応答は改善されており、線形フィードバック系の情報が途絶えた時、不安定になるようなバイアスを用いなくても良い。

本報告における計算およびシミュレーションは北大大型計算機センターを使用させていただいた。また、本報告を書くにあたって、御相談いただいた電気工学科電力講座の西谷健一助手と院生のみなさまに深く感謝いたします。

文 献

- 1) Fosha, Jr. C. E. Elgerd, O. I.: IEEE Trans. PAS-89 (1970) p. 563.
- 2) Cavin, III, R. K. Budge, Jr. M. C. Rasmusen, P.: IEEE Trans. PAS-90 (1971) p. 2472.
- 3) Moorthi, V. R. Aggarwal, R. P.: Proc. IEE vol. 119 (1972) p. 1653.
- 4) 江口正義・都築旋二: 電研研究報告 74053 (昭49).
- 5) 水谷芳史: 電気学会論文誌, B 98 (昭53-12), p. 971.
- 6) Elgerd, O. I. Fosha, Jr. C. E.: IEEE Trans. PAS-89 (1970) p. 556.