UDC 621.311.1.018:621.315.026.07

論文

60-B77

地域分割の電力システムにおける負荷周波数・ 連絡線電力制御の方式

正 員 河 竹 好 一 (豊橋技科大)

准 員 山 本 正 治 (豊橋技科大)

正 員 斉 藤 制 海 (豊橋技科大)

正 員 榊 原 建 樹 (豊橋技科大)

1. ま え が き

電力システムにおける負荷周波数制御 (LFC) には、周波数偏き連絡線電力制御 (TBC) または定周波数制御 (FFC) が用いられている⁽¹⁾。我々は負荷周波数・連絡線電力制御 (LTC) に現代制御理論を適用することを試みた。ここで対象としている電力システムは、電力会社のシステムを部分システムとし、放射状の部分システムを結合した連系システムである。

LTC の目的は次の二つである。(a) 時々刻々と変化する負荷に対してすべての部分システムの周波数の設定値からの偏差および結合された部分システム間の連絡線電力の設定値からの偏差を零に保つ。(b) 連絡線電力を時間帯ごとに設定されている目標値に追従させる。

制御の目的を (a) のみに限定するならば、制御系は最適レギュレータ理論 (LQ 技法) によって構成される。最近では現代制御理論を適用した LFC の研究がなされているが^{(2)~(14)}、これらの研究は (a)、(b) の目的を明示せず、両目的を同時に対象としたものではない。

そこで、(b) の目的に着目し、(a)、(b) の両方の目的を達成するには、対象とする部分システム群を一つにまとめた多地域連系システムに最適サーボ理論 (LQI 技法) を適用する手法を提案する。ここではこれを最適制御という。

このような最適制御を行なわせるには、全情報 (状態変数、時定数、慣性定数など) を一箇所に集めなければならず、従って経済性の面で困難となり、かつ各部分システムのシステム運用の独自性ということを考えると、必ずしも容易なことではない。そこで、自システムで入手可能な情報のみを用いて、各部分システム単位に最適サーボ理論を適用し、全体として準最適制御を行なう方法を提案する。すなわち、各部分システム間の結合は弱く、他システムからの干渉による外乱 (結合項) の大きさは自システムの外乱の大きさに比べて小さいという電力システムの特性を考慮し、この干渉項を省略して、各部分システムに最適サーボ理論を適用する地域分割手法を提案する。また、時間応答の数値計算を行なうことにより、最適制御と準最適制御の比較を行ない、提案する準最適制御の有効性について述べる。

実際のシステムではデジタル制御が採用されており、中央給電指令所は各 LTC 対象発電所に対し発電電力の指令値をある時間間隔で送っている。そこで、その時間間隔をどの程度にすることが望ましいかを検討する。

2. 理 論

LTC の対象とする負荷外乱の大きさおよび目標値の変化の大きさを微小と仮定すれば、電力システムの状態方程式を線形化して (1) 式で表わすことができる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、出力方程式は (2) 式で表わされる。

$$y = Cx \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x : n 次元状態ベクトル、 u : m 次元制御ベクトル、 w : q 次元外乱ベクトル、 y : p 次元出力ベクトル、 A : $n \times n$ 定数行列、 B : $n \times m$ 定数行列、

A Method of Load Frequency-Tie Line Power Control in Power System of Area Decomposition. By Koichi Kawatake, Member, Shoji Yamamoto, Associate, Osami Saito, Member & Tateki Sakakibara, Member (Toyohashi University of Technology)

河竹好一: 正員, 豊橋技術科学大学

山本正治: 准員, 豊橋技術科学大学

斉藤制海: 正員, 豊橋技術科学大学

榊原建樹: 正員, 豊橋技術科学大学

図 2 2地域連系システムのブロック線図

Fig. 2. Block diagram of two-area system.

表 1 モデルシステムのシステムパラメータ値
Table 1. Parameter values of model system.

パラメータ		第1系統	第2系統
調定率	Re (Hz/puMW)	2.22	4.50
ガバナ調整時定数	Tg (s)	0.1	0.08
タービン時定数	Tt (s)	0.25	0.3
慣性定数	M (puMW/s/Hz)	0.2	0.167
制動係数	D (puMW/Hz)	0.006	0.00833
系統容量	(MW)	1000	2000
同期化係数	T*12 (puMW/Hzs)	0.544	
系統容量換算定数	g12	2	
周波数	f (Hz)	60	

(puMW), ΔP_{tie} は連絡線電力偏差 (puMW) である。 ΔP_{tie} の基準電力は第2系統の系統容量であり, ΔP_{tie} は第1系統から第2系統へ流れる方向を正とする。また, ΔP_{ci} はスピードチェインジャに与える指令値の偏差 (puMW), ΔP_{di} は負荷の変化量 (puMW) である。

次に対象とする2地域連系システムに第3章で述べた分割方法を適用する。各系統での状態方程式および出力方程式は次のようになる。

$$\dot{x} = A_{11}x_1 + B_1u_1 + E_1w_1 + A_{12}x_2 \dots (13)$$

$$y_1 = C_1x_1 \dots (14)$$

$$\dot{x}_2 = A_{22}x_2 + B_2u_2 + E_2w_2 + A_{21}x_1 \dots (15)$$

$$y_2 = C_2x_2 \dots (16)$$

ここに

$$x_1 = [\Delta f_1 \Delta P_{t1} \Delta P_{g1} \Delta P_{tie}]^T$$

$$x_2 = [\Delta P_{tie} \Delta f_2 \Delta P_{t2} \Delta P_{g2}]^T$$

$$u_1 = \Delta P_{c1}, w_1 = \Delta P_{d1}$$

$$u_2 = \Delta P_{c2}, w_2 = \Delta P_{d2}$$

$$A_{11} \triangleq \begin{bmatrix} -D_1/M_1 & 1/M_1 & 0 & -a_{12}/M_1 \\ 0 & -1/T_{t1} & 1/T_{t1} & 0 \\ -1/T_{g1}R_1 & 0 & -1/T_{g1} & 0 \\ T_{12}^* & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T_{g1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -T_{12}^* & 0 & 0 \end{bmatrix}, E_1 \triangleq \begin{bmatrix} -1/M_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{22} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & -T_{12}^* & 0 & 0 \\ 1/M_2 & -D_2/M_2 & 1/M_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{t2} & 1/T_{t2} \\ 0 & -1/T_{g2}R_2 & 0 & -1/T_{g2} \end{bmatrix},$$

$$B_2 \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/T_{g2} \end{bmatrix}$$

$$A_{21} \triangleq \begin{bmatrix} T_{12}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, E_2 \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

出力方程式(2)式の C 行列および(14)式, (16)式の C_1, C_2 ベクトルは制御の目的に応じて決定しなければならない。LTC の目的を達成するためには $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie}$ の3項目を制御しなければならない。最適サーボ理論を適用して制御系を構成する場合, 出力数は入力数に等しくなければならない, Davison の条件を満足するような出力の取り方をしなければならない。

2地域連系システムにおいて可能な出力の取り方の組合せの代表的なものは表2に示す7通りである。ここで, 例えば表2の7番目の組合せについて, 第1系統の出力 y_1 を目標値 r に, 第2系統の出力 y_2 を $-r$ にすれば, 等価的に $\Delta f_1, \Delta f_2$ を零にし, かつ ΔP_{tie}

表 2 2地域連系システムにおける可能な出力の取り方の組合せ

Table 2. Combinations of possible output choice for two-area system.

	第1系統の出力 y_1	第2系統の出力 y_2
1	Δf_1	ΔP_{tie}
2	ΔP_{tie}	Δf_2
3	Δf_1	$\Delta f_2 - \Delta P_{tie}$
4	ΔP_{tie}	$\Delta f_2 - \Delta P_{tie}$
5	$\Delta f_1 + \Delta P_{tie}$	Δf_2
6	$\Delta f_1 + \Delta P_{tie}$	ΔP_{tie}
7	$\Delta f_1 + \Delta P_{tie}$	$\Delta f_2 - \Delta P_{tie}$

を r にすることができ、LTC の目的 (b) を達成させることができる。また、 y_1, y_2 を零にすれば、 $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie}$ を等価的に零にすることができ、目的 (a) を達成させる。

地域分割した場合可能な出力の取り方の組合せは表 2 中 4, 6, 7 番の 3 通りだけである。

この 3 通りの場合について、最適制御と準最適制御の数値計算 ($R_1=R_2=1.0, r=0.01$ puMW と $R_1=R_2=1.0, \Delta P_{tie}=0.01$ puMW) を行ない、ステップ状の目標値変化および負荷変化に対する制御性を比較した結果、表 2 中 7 番の出力の取り方の組合せが最も良いことを確認された。従って、各系統の出力を次のように与えた。

$$y_1 = \Delta f_1 + \Delta P_{tie}, \quad y_2 = \Delta f_2 - \Delta P_{tie}$$

すなわち、 C, C_1, C_2 は次のように構成される。

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 1], \quad C_2 = [-1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

また、(5) 式の二次評価関数は次のようになる。

$$J = \int_0^\infty [\{\Delta f_1 + (\Delta P_{tie} - r)\}^2 + \{\Delta f_2 - (\Delta P_{tie} - r)\}^2 + R_1 v_1^2 + R_2 v_2^2] dt \quad (17)$$

ここで、 R を次のように対角線要素のみに値を与える。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}$$

同様に、(11) 式の 2 次評価関数は次のようになる。

$$J_i = \int_0^\infty [\{\Delta f_i \pm (\Delta P_{tie} - r)\}^2 + R_i v_i^2] dt \quad (18)$$

(18), (19) 式の $\pm$ は $i=1$ のとき $+$ 、 $i=2$ のとき $-$ である。

次章の数値計算では、 $R_1=R_2$ とし、 R_1 と R_2 の値を与える。

5. 数値計算の結果と考察

提案する準最適制御の有効性を確かめるために、ディジタル計算機による時間応答の数値計算を行なった。TBC では次の積分フィードバック制御を用いた。

$$u_i = -K_{ti} \int \{K_{pi} \Delta f_i \pm a_{i2} (\Delta P_{tie} - r)\} dt \quad (19)$$

ここで、 a_{22} は 1 であり、 K_{pi} は系統定数を用い、 $K_{pi} = D_i + 1/R_{ti}$ 、 $K_{p1} = 0.46$ 、 $K_{p2} = 0.23$ である。 K_{ti} は実際に数値計算を行ない。モデル系統において最良の値を用いた。その値は $K_{t1} = K_{t2} = 0.5$ である。

数値計算は次の 3 項目について行なわれている。

- (1) TBC と最適制御、準最適制御の比較
- (2) 指令時間間隔と R_1, R_2 を変えたときの最適制御と準最適制御の比較
- (3) 最適前御と準最適制御における、負荷外乱に対する周波数特性の比較

(1), (2) については、ステップ状目標値変化とステップ状負荷変化のそれぞれについて数値計算を行なう。目標値変化とは第 2 系統から第 1 系統へ向かって連絡線電力の目標値が 0.01 puMW ($r_1=0.01, r_2=-0.01$) 変化した場合である。

(2) の指令時間間隔とは、系統内の各状態変数を測定して指令値を計算した後、発電機のスピードチェインジャに指令が送られるまでの時間間隔をいう。

〈5・1〉 (1) に対する結果と考察 図 3 は目標値変化に対する応答の計算結果であり、図 4 は負荷変化に対する応答の計算結果である。ここで負荷変化とは第 1 系統に 0.01 puMW の負荷が変化した場合である。両図ともに R_1, R_2 は 1.0 としており、指令時間

図 3 目標値変化に対する各制御方式による応答

Fig. 3. Responses to objective value change for each control.

図 4 負荷変化に対する各制御方式による応答

Fig. 4. Responses to load change for each control.

間隔は非常に短く連続的な制御が行なわれている。

図 3, 図 4 において, 最適制御と準最適制御の差はほとんど認められず, TBC は最適制御, 準最適制御に比べて Δf_1 , Δf_2 , ΔP_{tie} の応答が安定するのに長い時間を要しており, その時間は約 20 秒である。また図 4 より最適制御, 準最適制御の ΔP_{e2} は大きく変化しているのに対して, TBC ではほとんど変化していない。このことより最適制御, 準最適制御は TBC に比べて両系統間の制御の協調がより良く行なわれ, 早く平衡状態に落ち着かせることが可能である。

〈5・2〉 (2) に対する結果と考察 表 3, 表 4 は (2) に対する数値計算の結果を次の二つの条件に従って分類したものである。

条件 1: Δf_1 , Δf_2 , ΔP_{tie} の応答は 10 秒以内に安定すること。

条件 2: ΔP_{e1} , ΔP_{e2} の最大値は平衡値の 150% を超えないこと。

この二つの条件は数値計算の結果を比較検討するために筆者らが設定した条件であり, 現場で適用する場合には適切な値を選定されればよい。

表 3, 表 4 の○印は条件 1, 2 とも満足する点, □印は条件 1 のみ満足する点, そして△印は条件 2 のみ満足する点である。空白の部分は両方の条件とも満足しない点もしくは発散してしまう点であり, その大部分は発散してしまう点である。発散は指令時間間隔が大きくなったときに起こり, R_1, R_2 の値が小さくなると起こりやすくなる。この傾向は以下で述べる考察により R_1 と R_2 が小さくなると F の自系統分の要素の絶対値と F_i の要素の絶対値が大きくなるためである。

図 5 に目標値変化に対する応答の計算結果の一例を示し, 図 6 に負荷変化に対する応答の計算結果の一例を示す。図 5, 図 6 とともに

- (a) $R_1 = R_2 = 0.1$, 指令時間間隔 0.1 秒
- (b) $R_1 = R_2 = 1.0$, 指令時間間隔 0.1 秒

表 3 目標値変化に対する計算結果

Table 3. Simulation result to objective value change.

目標値	制御の種類	(R ₁ , R ₂)	指令時間間隔				
			0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
r ₁ = 0.01	最適制御	(0.05 0.05)	○	□			
		(0.1 0.1)	○	○			
		(0.2 0.2)	○	○			
		(0.5 0.5)	○	○	○		
		(1.0 1.0)	○	○	○	△	△
r ₂ = -0.01	準最適制御	(0.05 0.05)	○	□			
		(0.1 0.1)	○	○			
		(0.2 0.2)	○	○			
		(0.5 0.5)	○	○	○		
		(1.0 1.0)	○	○	○	△	△

表 4 負荷変化に対する計算結果

Table 4. Simulation result to load change.

外乱	制御の種類	(R ₁ , R ₂)	指令時間間隔				
			0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
ΔP _{d1} = 0.01	最適制御	(0.05 0.05)	○	□			
		(0.1 0.1)	○	○			
		(0.2 0.2)	○	○	○		
		(0.5 0.5)	○	○	○		
		(1.0 1.0)	○	○	○	△	△
ΔP _{d2} = 0	準最適制御	(0.05 0.05)	○	□			
		(0.1 0.1)	○	○			
		(0.2 0.2)	○	○	△		
		(0.5 0.5)	○	○	○		
		(1.0 1.0)	○	○	○	△	△
ΔP _{d1} = 0	最適制御	(0.05 0.05)	□	□			
		(0.1 0.1)	○	□			
		(0.2 0.2)	○	○			
		(0.5 0.5)	○	○	△		
		(1.0 1.0)	○	○	△	△	△
ΔP _{d2} = 0.01	準最適制御	(0.05 0.05)	□	□			
		(0.1 0.1)	○	□			
		(0.2 0.2)	○	○			
		(0.5 0.5)	○	○	△		
		(1.0 1.0)	○	○	△	△	△

(c) $R_1 = R_2 = 1.0$, 指令時間間隔 0.2 秒

の 3 点について, 最適制御と準最適制御の結果を示したものである。

図 5 (a) と (b) および図 6 (a) と (b) において最適制御と準最適制御の差はほとんど認められない。また, 表 5 は $R_1 = R_2 = 0.1$ と $R_1 = R_2 = 1.0$ の場合における F の要素と F_i の要素の値を示したものである。

F の自系統の状態変数にかかる要素の絶対値と他系統の状態変数にかかる要素の絶対値を比べた場合, 例えば Δf_1 と Δf_2 にかかる要素の絶対値を比べると,

図 5 目標値変化に対する応答の例

Fig. 5. Examples of response to objective value change.

図 6 負荷変化に対する応答の例

Fig. 6. Examples of response to load change.

表 5 F , F_i 要素の値
Table 5. Values of F , F_i element.

$(R_1 \ R_2)$	制御の種類	Δf_1	ΔP_{t1}	ΔP_{g1}	ΔP_{tie}	Δf_2	ΔP_{t2}	ΔP_{g2}	$\int y_1 dt$	$\int y_2 dt$
(0.1 0.1)	最適制御	-1.155	-1.101	-0.371	2.659	-0.219	-0.124	-0.020	-3.160	0.122
		-0.096	-0.070	-0.026	-1.058	-1.567	-1.758	-0.392	-0.122	-3.160
	準最適制御	-1.147	-1.100	-0.371	2.870				-3.162	
					-1.279	-1.532	-1.730	-0.387		-3.162
(1.0 1.0)	最適制御	-0.301	-0.349	-0.130	1.050	-0.131	-0.130	-0.029	-0.992	0.129
		-0.113	-0.101	-0.036	-0.550	-0.562	-0.781	-0.190	-0.130	-0.992
	準最適制御	-0.160	-0.201	-0.077	0.966				-0.707	
					-0.753	-0.327	-0.503	-0.126		-0.707

$R_1=R_2=0.1$ のときはその比率は約 5 倍であるのに対して、 $R_1=R_2=1.0$ のときはその比率は約 2.3 倍となっており、前者の方は他系統からの影響が少ない形になっている。また R_1, R_2 で同じ値であって、 F_i の要素の値は F の自系統分の要素の値とほとんど差がない。

このように R_1, R_2 を小さくして F の他系統分の要素の絶対値より自系統分の要素の絶対値を大きくする方が、準最適制御は最適制御により近くなる。しかしこの反面、指令時間間隔を大きくすると表 3、表 4 からわかるように不安定になりやすいので、その妥協点を制約の範囲内で決定しなければならない。

次に指令時間間隔の影響について検討する。最適制御、準最適制御ともに、指令時間間隔を 0.1 秒にした図 5 (b) および図 6 (b) では連続制御の図 3 および図 4 の場合と同様に約 7 秒で平衡状態になる。しかし、指令時間間隔を 0.2 秒にした図 5 (c) および図 6 (c) では平衡状態に達するのにいずれも約 20 秒の時間を要し、図 5 (c) および図 6 (c) の $\Delta P_{e1}, \Delta P_{e2}$ は図 5 (b) および図 6 (b) の $\Delta P_{e1}, \Delta P_{e2}$ に比べて振動が発生している。一般に、指令時間間隔が大きくなると、最適制御および準最適制御ともに発散してしまう。

以上の検討結果より、今回のモデル系統において指令時間間隔を 0.1 秒程度にすることが望ましい。

〈5・3〉 (3) に対する結果と考察 図 7 に負荷の外乱に対する周波数応答を示す。ここでは、第 1 系統に最大値 0.01 puMW の正弦波状負荷変化を加え、指令時間間隔を 0.1 秒とした。縦軸の利得は $20 \log_{10} (\Delta f_{\max} / \Delta P_{d1\max})$ で表わし、位相は $-\Delta f_1$ と ΔP_{d1} との相差角を度で表わしている。

まず、利得について考察する。 $R_1=R_2=0.1$ および $R_1=R_2=1.0$ のそれぞれの場合において、最適制御の

図 7 負荷外乱に対する周波数応答

Fig. 7. Frequency response to load disturbance.

利得と準最適制御の利得は等しく、周期 10 秒以上の負荷外乱に対してこれらの利得は -5 以下 ($\Delta P_{d1} = 0.01$ puMW に対して $\Delta f_{\max} = 0.0056$ Hz 以下) であり、両制御系は負荷変化を比較的よく吸収している。また、負荷変化の同じ周期において $R_1=R_2=0.1$ のときの利得は $R_1=R_2=1.0$ のときの利得より小さく (約 -5)、 R_1, R_2 の値が小さいときの制御系は負荷変化をより良好に吸収している。

次に R_1, R_2 および負荷変化の周期がそれぞれ等しい点の準最適制御の位相は最適制御の位相より少し小

さい。例えば $R_1=R_2=1.0$ 、周期 10 秒において位相の遅れ時間は約 0.3 秒である。

以上のことより、最適制御と準最適制御の制御特性がよく似ていることを確認できるとともに、負荷変動の周期が 10 秒以上であれば、準最適制御によって負荷変化を吸収できることを確認した。

6. む す び

負荷周波数・連絡線電力制御の二つの目的に答えるために、現代制御理論の最適サーボ理論を適用した制御系の構成を提案した。また、いくつかの電力会社の電力系統をまとめた多地域連系系統に対して、系統の特性を考慮した分割手法の一案（準最適制御）を合せて提案した。そして提案する準最適制御の有効性を確かめるために、デジタル計算機による時間応答の数値計算を 2 地域連系のモデル系統について行なった。その結果次のことが明らかになった。

(1) 最適サーボ理論を適用することによって、負荷周波数・連絡線電力制御の二つの目的を同時に満足する制御系を構成できた。

(2) ステップ状目標値変化、負荷変化に対して、連続制御における最適制御と準最適制御の応答は非常に良く似ており、制御性は TBC より優れている。

(3) 準最適制御は指令時間間隔を 0.1 秒にすることが可能なら十分有効な制御方式である。

(4) 負荷外乱に対する周波数特性において、準最適制御の特性は最適制御の特性に比べて位相は少し遅れるが、利得は全く同じである。

以上で述べたことより、本論文の考え方および数値計算による検討の手順は実系統への適用に対し有効な手段である。

終りに、実用面での貴重な意見をいただいた中部電

力株式会社系統運用部の関係者に感謝するとともに全面的な協力をいただいた本学大学院学生 大谷克己君に感謝する。

(昭和 59 年 5 月 23 日受付、同 60 年 4 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 給電常置専門委員会：「電力系統の負荷周波数制御」電気学会技報 Ⅱ部，40 (昭 52-2)
- (2) O.I. Elgerd & C.E. Fosha: "Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy System" *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-89, 4, 556 (1970)
- (3) C.E. Fosha & O.I. Elgerd: "The Megawatt-Frequency Control Problem, A New Approach via Optimum Control Theory" *ibid.* PAS-89, 4, 563 (1970)
- (4) R.K. Cavin, M.C. Budge & P. Rasmussen: "An Optimal Linear Systems Approach to Load Frequency Control" *ibid.* PAS-90, 6, 2472 (1971)
- (5) S.M. Miniesy & E.V. Bohn: "Optimum Load-Frequency Control with Unknown Deterministic Power Demand" *ibid.* PAS-91, 1910 (1972)
- (6) 中村・斎崎：「最適制御理論を用いた自動周波数制御の新方法」電学誌 B, 97, 397 (昭 52-7)
- (7) 白井・大塚：「情報分割による多地域電力系統の負荷周波数制御」電学誌 B, 99, 417 (昭 54-7)
- (8) 白井：「従来の TBC と協調を有する負荷周波数制御法」電学誌 B, 100, 723 (昭 55-12)
- (9) 水谷：「地域分割手法を用いた LFC の準最適制御」電学誌 B, 98, 971 (昭 53-12)
- (10) 水谷：「地域・分割縮約手法を用いた PI 形 LFC の準最適制御」電学誌 B, 100, 9 (昭 55-1)
- (11) 水谷：「地域分割，出力フィードバック手法を用いた LFC の準最適制御」電学誌 B, 101, 17 (昭 56-1)
- (12) 檜山：「発電量の増加率に対する制約を考慮した分散形負荷周波数制御」電学誌 B, 102, 477 (昭 57-7)
- (13) 川畑・木戸：「電力系統における負荷周波数制御の分散方式」電学誌 B, 102, 529 (昭 57-8)
- (14) 田中・長谷川：「積分補償および状態フィードバックを用いた負荷周波数制御方式」電学誌 B, 103, 813 (昭 58-12)
- (15) 山本・河竹：「電力系統における一負荷周波数制御方式」電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，85 (昭 58)
- (16) 関根：「電力系統工学」(昭 51) 電気書院
- (17) 古田・佐野：「基礎システム理論」(昭 53) コロナ社