

ファジー形負荷周波数制御と経済負荷配分制御とを 協調した自動発電制御

Automatic Generation Control

Coordinating Fuzzy-type Load Frequency Control and Economical Load Dispatching Control

雪田 和人* 後藤 泰之* 一柳 勝宏* 李 揚** 水谷 芳史***

Kazuto Yukita, Yasuyuki Goto, Katuhiro Ichianagi, Li Yang, Yoshibumi Mizutani

Abstract This paper proposes a new automatic generation control coordinating the fuzzy-type load frequency control (FLFC) and a economical load dispatching control (EDC). First, the proposed control in LFC uses the output set-point control based on the power demand estimation, the self-regulation of generators which are set an optimal point and the fuzzy control used a phase plane. Also, the optimal point of the self-regulation of generators and the tuning parameters of the fuzzy control are designed with the Genetic Algorithm (GA). Next, EDC implements the prediction control to estimate that the demand would change in several minutes by using recursive least square (RLS) method. Then, the coordination method of LFC and EDC is a parallel-distribution method. Because, LFC and EDC share in freng and sustain load respectively.

To study the effectiveness of the proposed control, a 3-area longitudinal system which is composed of reheat and non-reheat steam power plants for LFC and reheat steam power plant for EDC considered as a model system for the computer simulation.

1. はじめに

近年、社会生活や産業の高度化、多様化に伴い電力系統は大規模・複雑化し、電力供給の信頼性、質的向上への社会的要請が益々強まっている。このため電力系統の需給制御技術は、さらに重要視され高度化する傾向にある。現在の需給制御技術は、年間、月間、週間、翌日の需給運用計画であるオフライン需給制御と当日の需給運用計画であるオンライン需給制御と大きく分けられ運用されている。このうち、オンライン需給制御である自動発電制御 (*Automatic Generation Control*: AGC) は、主として、刻一刻の需給バランスをとるための負荷周波数制御 (*Load frequency Control*: LFC)、および全体の経済性を追求しながら各供給力を適正に配分するための経済負荷配分制御 (*Economical Load Dispatching Control*: EDC) から構成されている。ここで、実際の電力系統では、電力需要が天候、気温などの変化に大きく左右されるため、前日までの需給計画で求めた需要と実績との間に必ず誤差が生じる。従って、オンライン需給制御では、現在の時刻までに生じた予測誤差を考慮し、需要変動を新たに予測する必要がある。しかしながら、天候、気温などの急変により需要予測が大きく狂い、需給のバラン

スが崩れるために発電所出力の変更が必要となってくる。このために、電力系統では、需要と供給がアンバランスとなり、再び需要と供給がバランスするまでに、周波数、連系線潮流が変動するなどという需給制御の問題が生じている^{(1)~(4)}。

そこで、これらの問題点を解決するために、本論文では、ファジー形負荷周波数制御⁽⁵⁾とオンライン経済負荷配分制御とを協調した新しい自動発電制御を提案する。提案する自動発電制御におけるLFCとEDCの結合方式は、LFCが需要変動の短周期成分を、EDCが長周期成分を分担するものとし並列再配分方式とする⁽¹⁾。このうち、まずLFCでは、負荷推定機構による出力設定制御、調定率の実用範囲での最適化、位相平面形ファジー制御を組み合わせた制御を実施する。次にEDCでは、自地域の発電所の総出力偏差と各地域と連系する連系線潮流偏差の総和から、逐次最小二乗法⁽⁶⁾を用いて当日の運用計画に基づくEDC信号の逐次修正を行い、数分先の需要変動を予測する予測制御を実施する。ただし、本論文においては、最経済負荷配分などの計画はすでに行われたものとしている^{(7)、(8)}。

さらに、調定率の実用範囲での最適化とファジー制御器の調整パラメータは、遺伝的アルゴリズム (*Genetic Algorithm*: GA)⁽⁹⁾を用いて、LFCをEDCに対し

* 愛知工業大学電気工学科 (豊田市)
** 中国東南大学電力工程系 (中国南京市)
*** 東海大学 工学部 電気工学科 (平塚市)

で最適に協調するように設計している。

本論文では, 本制御手法の有効性を立証するために, LFCならびにEDC発電所を含んだ3地域くし形AGCモデルを用いて従来法との比較検討をする。

2. モデル系統

図1は, 本論文で用いた3地域くし形AGCモデルで, 地域2を示している。モデル系統は各地域で, 非再熱・再熱系LFC発電所⁽⁶⁾と再熱系EDC発電所⁽⁷⁾から構成され, LFC発電所とEDC発電所の構成は, 並列配分方式を採用している。また, 地域1:地域2:地域3の容量比は5:10:2である。

更に, 実際の発電所においては, 朝昼の立ち上がり時などで比較的大きな負荷変動が生じた場合, 発電電力増加率制限 (Generation Rate Constraints:GRC) 内でしか出力できない。そこで本論文では, 次のように各地域におけるLFC発電所の调速機出力偏差に出力変化速度限度⁽¹⁰⁾と, タービンの出力偏差にGRCを設ける⁽⁵⁾。さらに, EDC発電所に対しても, 次のように调速機出力速度限度, タービン出力偏差にGRCを設ける^{(11), (5), (7)}。

$$|\Delta \dot{P}_{Ngi}| \leq g_{\max-Ngi} = 0.1 \text{ (P.U.MW/s)} \quad \dots (1)$$

$$|\Delta \dot{P}_{Rgi}| \leq g_{\max-Rgi} = 0.1 \text{ (P.U.MW/s)} \quad \dots (2)$$

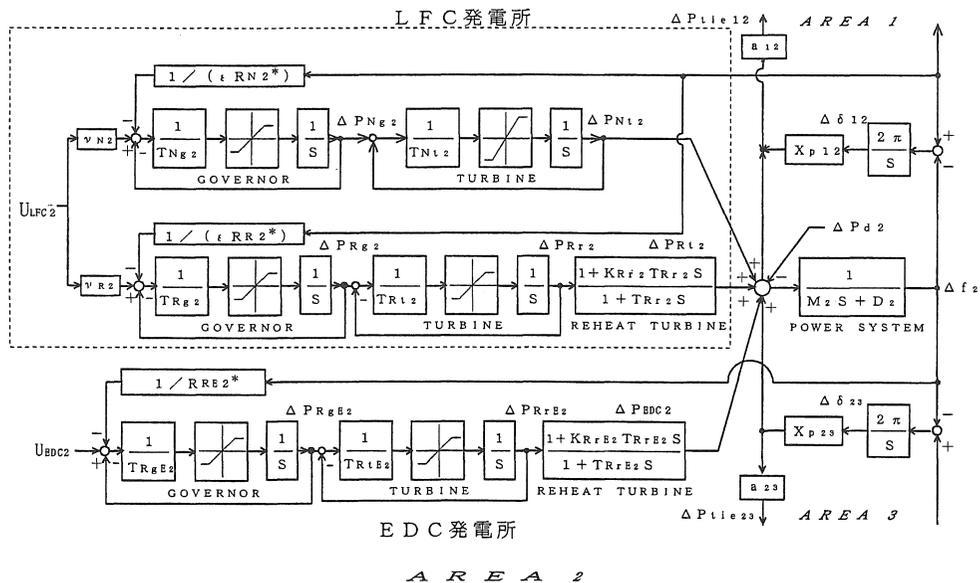
$$|\Delta \dot{P}_{Nt1}| \leq g_{\max-Nt1} = 0.05/60 \text{ (P.U.MW/s)} \quad \dots (3)$$

$$|\Delta \dot{P}_{Rt1}| \leq g_{\max-Rt1} = 0.03/60 \text{ (P.U.MW/s)} \quad \dots (4)$$

$$|\Delta \dot{P}_{RgE1}| \leq g_{\max-RgE1} = 0.1 \text{ (P.U.MW/s)} \quad \dots (5)$$

$$|\Delta \dot{P}_{RtE1}| \leq g_{\max-RtE1} = 0.03/60 \text{ (P.U.MW/s)} \quad \dots (6)$$

ただし, $\Delta \dot{P}_{Nri}$: 非再熱LFC発電所の调速機出力偏差, $\Delta \dot{P}_{Nt1}$: 非再熱LFC発電所のタービン出力偏差, $\Delta \dot{P}_{Rgi}$: 再熱LFC発電所の调速機出力偏差, $\Delta \dot{P}_{Rt1}$: 再熱LFC発電所のタービン出力偏差, $\Delta \dot{P}_{RtE1}$: 再熱EDC発電所のタービン出力偏差, $g_{\max-Ngi}, g_{\max-Nt1}$: 各々非再熱LFC発電所における调速機の出力速度限度値, タービンの増加率制限値, $g_{\max-Rgi}, g_{\max-Rt1}$: 各々再熱LFC発電所における调速機の出力速度限度値, タービンの増加率制限値, $g_{\max-RgE1}, g_{\max-RtE1}$: 各々EDC発電所における调速機出力偏差, $\Delta \dot{P}_{RgE1}$: 再熱EDC発電所の调速機出力の出力速度限度値, タービンの増加率制限値。



- M_i : 慣性定数 (P.U.MW.s/Hz)
- T_{Nt1} : 非再熱火力LFC発電所のタービン時定数 (s)
- T_{RtE1} : 再熱火力EDC発電所のタービン時定数 (s)
- T_{RrE1} : 再熱火力LFC発電所の再熱タービン時定数 (s)
- T_{Ng1} : 再熱火力EDC発電所のガバナ時定数 (s)
- T_{Rg1} : 再熱火力LFC発電所のガバナ時定数 (s)
- R_{N1} : 非再熱火力LFC発電所の調定率 (Hz/P.U.MW)
- R_{R1} : 再熱火力LFC発電所の調定率 (Hz/P.U.MW)
- R_{R1} : 再熱火力EDC発電所の調定率 (Hz/P.U.MW)
- v_{N1} : 非再熱火力LFC発電所に対する出力配分係数
- K_{R1} : 再熱火力LFC発電所の再熱係数
- U_{R1} : LFCの制御操作量
- U_{DC1} : EDCの制御操作量
- D : 負荷ダンピング係数 (P.U.MW/Hz)
- T_{Nt2} : 再熱火力LFC発電所のタービン時定数 (s)
- T_{RtE2} : 再熱火力LFC発電所の再熱タービン時定数 (s)
- T_{RrE2} : 再熱火力EDC発電所のガバナ時定数 (s)
- T_{Ng2} : 再熱火力EDC発電所のガバナ時定数 (s)
- R_{N2} : 非再熱火力LFC発電所の調定率 (Hz/P.U.MW)
- R_{R2} : 再熱火力LFC発電所の調定率 (Hz/P.U.MW)
- R_{R2} : 再熱火力EDC発電所の調定率 (Hz/P.U.MW)
- a_{ij} : 地域i-j間の換算容量定数
- v_{R1} : 再熱火力LFC発電所に対する出力配分係数
- K_{R1} : 再熱火力EDC発電所の再熱係数
- i : 地域iを示し, $i=1,2,3$
- ϵ : 測定率の倍率

$$X_{Dij}(\delta_{ij}) = P_{tieijmax} \{ \sin(\delta_{ij} + \Delta\delta_{ij}) - \sin\delta_{ij} \} = \Delta P_{tieij}$$

図1 LFCならびにEDC発電所を含んだ3地域くし形AGCモデルの地域2の構成線図
Fig.1 Block diagram of area 2 in 3-area longitudinal non-linear system.

3. 提案する制御手法

LFCとEDCとの結合方式は、現在種々の結合方式が提案されているが、LFCで需要変動の短周期成分を分担し、EDCで長周期成分を分担するという目的から並列配分方式を採用する^{(1)・(3)}。そして、提案する制御手法は、次に示すようにLFC発電所に対して、負荷推定機構からなる出力設定制御、調定率の実用範囲での最適化、ファジー制御を実施し、EDC発電所に対して逐次最小二乗法⁽⁶⁾に基づく予測制御を実施する。さらに、LFCがEDCに対して最適に協調するように、GAを用いて調定率の実用範囲での最適化とファジー制御器の調整パラメータを、EDCの予測制御を実施しながら設計する。

3.1 LFC発電所の制御手法

(i) EDC発電所を考慮した出力設定制御

本論文では、まず次式の負荷推定機構を用いて各地域で自地域の需要変動量である負荷変動量 $\Delta P_{di}(k)$ を推定する。すなわち、各地域に非再熱・再熱LFC発電所、再熱EDC発電所を有する地域 i の負荷推定機構は、次式を用いて負荷推定値 $\Delta \tilde{P}_{di}(k)$ を算出する。

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{P}_{di}(k_d) = & (1/2) [(-M_i/T_{dk}) \{\Delta f_i(k_d) - \Delta f_i(k_d-1)\} \\ & + \Delta P_{Nti}(k_d-1) + \Delta P_{Rti}(k_d-1) + \Delta P_{EDCi}(k_d-1) \\ & - D_i \Delta f_i(k_d-1) + \sum_{j=1}^l a_{ij} \Delta P_{tiej}(k_d-1)] \\ & + (1/2) \Delta \tilde{P}_{di}(k_d-1) \quad \dots (7) \end{aligned}$$

ただし、 M_i :電力系統の慣性係数、 D_i :系統のダンピング係数、 Δf_i :周波数偏差、 ΔP_{Nti} 、 ΔP_{Rti} :各々非再熱・再熱LFC発電所の出力偏差、 ΔP_{EDCi} :再熱EDC発電所の出力偏差、 l は地域数、 $\Delta \tilde{P}_{di}(k_d)$: k_d 時刻の負荷推定値、 a_{ij} :系統容量換算係数、 ΔP_{tiej} :地域 $i-j$ 間の連系線潮流偏差、 i :地域 i 、 k_d :負荷推定を実施する推定時刻、 T_{dk} :負荷推定のサンプル周期で $T_{dk} = T_k/n_d$ 、 T_k :制御操作量のサンプル周期、 n_d :正の整数。

そして、(7)式から T_{dk} で推定された $\Delta \tilde{P}_{di}(k_d)$ を、制御操作量のサンプル周期 T_k と次のように同期させる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \tilde{P}_{di}(k) &= \Delta \tilde{P}_{di} \left(\frac{k_d}{n_d} \right), \\ k &= \frac{k_d}{n_d} \leq t < k+1 = \frac{k_d+1}{n_d} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

ただし、 k :時刻、 t :実時間。

次に、(8)式で算出された $\Delta \tilde{P}_{di}(k)$ を自地域のEDC発電所を考慮し、LFC発電所の出力設定制御操作量 $r_{LFCi}(k)$ は次式とする。

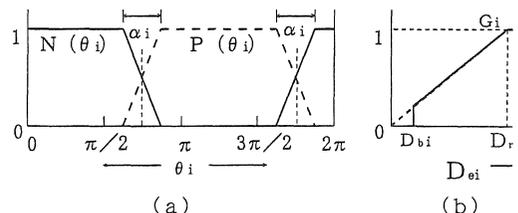
$$r_{LFCi}(k) = \Delta \tilde{P}_{di}(k) - \Delta P_{EDCi}(k) \quad \dots (9)$$

(ii) 調定率の実用範囲での最適化 调速機の調定率は、小さいほど同一の周波数変化に対して発電機出力変

化が大きい。従って、この調定率の選定は、周波数制御において制御の仕上がりを左右する最も重要な要素である。現在、この調定率は、タービン・ボイラーなどを考慮し、0~10%の範囲で設定されている⁽¹¹⁾。そこで、本論文では提案する出力設定制御が最も効果的に作用するように、3.3節に従い実用範囲で最適化する。

(iii) ファジー制御⁽⁵⁾

周波数と連系線潮流を速やかに収束させると共にロバスト性を高めるために、周波数偏差とその変化分を入力とした位相平面形ファジー制御を実施する。このファジー制御操作量 U_{Fi} は、図2のメンバシップ関数より、次式を用いて算出する。



- $P\{\theta_i(k)\}$: 正方向のメンバシップ関数
- $N\{\theta_i(k)\}$: 負方向のメンバシップ関数
- $\theta_i(k) = c \circ s^{-1} \{ \Delta f_i(k) / D_{ei}(k) \}$
- $G_i\{D_{ei}\}$: D_{fi} のメンバシップ関数
- D_{fi} : $G_i\{D_{ei}\}$ が1となる調整パラメータ
- $D_{ei}(k) = \{ \Delta f_i(k)^2 + (S_{ri} \Delta e_i(k))^2 \}^{1/2}$
- S_{ri} : スケーリングファクタ
- D_{bi} : 不感帯を表すパラメータ

図2 メンバシップ関数

Fig.2 Membership functions.

$$U_{Fi}(k) = \frac{N\{\theta_i(k)\} - P\{\theta_i(k)\}}{N\{\theta_i(k)\} + P\{\theta_i(k)\}} \eta_i G_i(k) \quad \dots (10)$$

ただし、 η_i :ファジー制御操作量の最大値を規格化する調整パラメータ。

従って、情報の伝送遅れや制御操作量算出のための時間遅れを1サンプルの演算時間遅れとして考慮した、地域 i でのLFC発電所の制御操作量 $U_{LFCi}(k)$ は次式となる。

$$U_{LFCi}(k) = r_{LFCi}(k-1) + U_{Fi}(k-1) \quad \dots (11)$$

ただし、 U_{Fi} :ファジー制御操作量。

3.2 EDC発電所の制御手法

オンライン経済負荷配分制御を実施するEDC発電所は、前日の需要予測と当日における実際の需要との誤差を逐次修正し、将来の数分先の需要変動である負荷を予測する予測制御が実施されている⁽¹⁾。そこで本論文のEDCでも、逐次最小二乗法により T_{ds} 秒先の需要を予測し、 T_{ds} 秒ごとにEDCの制御信号を修正する予測制御を実施する。まず、逐次最小二乗法を実施するため、文献(7)と同様に、次式に示す隣接地域からの連系線潮流偏差と自地域の発電所出力偏差の総

和 G_{Ti} を使用する。

$$G_{Ti}(k_s) = \Delta P_{Nti}(k_s) + \Delta P_{Rti}(k_s) + \Delta P_{EDCi}(k_s) + \sum_{m=1}^n \Delta P_{t_{i\alpha m}}(k_s) \dots (12)$$

ただし, k_s : 逐次最小二乗法のサンプル時刻。

次に, この G_{Ti} を用いて逐次最小二乗法により, 次式に示す一次近似式として負荷を予測する⁽⁶⁾。

$$\Delta P_{YDi}(t) = -\hat{a}_{di}(k_{ds}T_{ds})G_{Ti}(k_{ds}T_{ds}) + \hat{b}_{di}(k_{ds}T_{ds})t \dots (13)$$

ただし, ΔP_{YDi} : 地域 i の需要変動の予測値, $k_{ds}T_{ds} \leq t < (k_{ds}+1)T_{ds}$, k_{ds} : 予測のサンプル時刻, T_{ds} : 予測のサンプル周期。

ここで, (13)式の \hat{a}_{di} , \hat{b}_{di} は次式より算出する。

$$\hat{\theta}_{Nb}^T = [\hat{a}_{si}(k_s), \hat{b}_{si}(k_s)] \dots (14)$$

ただし,

$$Z_i^T = [-G_{Ti}(k_s-1), t] \\ \hat{\theta}_{Nb} = \hat{\theta}_{Nb-1} + P_{Nb}Z_{Nb}(G_{Ti}(k_s) - Z_{Nb}^T\hat{\theta}_{Nb-1}) \\ P_{Nb} = P_{Nb-1} - \frac{P_{Nb-1}Z_{Nb}Z_{Nb}^TP_{Nb-1}}{1 + P_{Nb-1}} \dots (15)$$

ここで, θ_{Nb} : N_b 個のデータで得られる推定値, N_b : データの個数, \hat{a}_{si} , \hat{b}_{si} : k_s ごとの \hat{a}_{di} , \hat{b}_{di} の推定値。

そして, \hat{a}_{si} , \hat{b}_{si} を逐次最小二乗法のサンプル周期 T_s ごとのデータで逐次修正し, 次式に示すように T_{ds} と同期を取り(13)式から T_{ds} 秒先の需要変動量を予測する。

$$\hat{a}_{di}(k_{ds}T_{ds}) \equiv \hat{a}_{di}(k_{ds}) = \hat{a}_{si}\left(\frac{k_s}{n_s}\right) \\ \hat{b}_{di}(k_{ds}T_{ds}) \equiv \hat{b}_{di}(k_{ds}) = \hat{b}_{si}\left(\frac{k_s}{n_s}\right) \\ G_{Ti}(k_{ds}T_{ds}) \equiv G_{Ti}\left(\frac{k_s}{n_s}\right) \dots (16)$$

ここで, n_s : 正の整数。

そして, EDC発電所の制御操作量 U_{EDCi} としては, (13)式で求められた ΔP_{YDi} を制御のサンプル周期 T_k でサンプルし, さらにLFCと同様に1サンプルの演算時間遅れを考慮して次式とする。

$$U_{EDCi}(k) = \Delta P_{YDi}(k-1) \dots (17)$$

<3.3> GAを用いた調定率の最適化とファジー制御器の調整パラメータの設計手法 LFC発電所で用いる調定率の実用範囲を考慮した最適化とファジー制御器の調整パラメータ D_{ri} , η_i , S_{ri} , α_i の設計は, LFCをEDCに対して協調させるようにLFCとEDCの各制御を実施しながら高速化GAを用いて, 一括して設計する。ここで一括設計に関しては, 調定率の倍率 ε とファジー制御器の調整パラメータ D_{ri} , η_i , S_{ri} , α_i を経験に基づく範囲で各々2進数で遺伝子に変換する。そして, 各地域のLFC発電所で<3.1>節

のLFC発電所の制御手法を, EDC発電所で<3.2>節の予測制御を実施し, 各地域いっせいに基準外乱を与え行う。適応度 G_{io} はLFCの目標とする周波数偏差と連系線潮流偏差を最小化すると共にEDCの目標とする需給バランスを取るよう, さらに過度のファジー制御とならないように, 次の評価関数 J_{i1} を最小化するものとし, その逆数とする。

$$J_{i1} = \sum_{k=0}^h (|\Delta f_i(k_d)| + \sum_{n=1}^q |a_n \Delta P_{i\alpha n}(k_d)| + |U_{Fi}(k_d)| + |\dot{U}_{Fi}(k_d)|) \times t_k^2 \dots (18)$$

$$G_{io} = 1 / \sum_{i=1}^I J_{i1} \dots (19)$$

ただし, $\dot{U}_{Fi}(k_d)$: ファジー制御操作量の1サンプル間の変化分。

4. シミュレーション結果と検討

本論文では, 図1のモデル系統に対して表1の定数を用い, $T_{dk} = 0.02$ (s), $T_k = 0.1$ (s), $T_s = 5.0$ (s), $T_{ds} = 6.0$ (s), $n_d = 5$, $n_s = 5.0$ とし, シミュレーション時間を360秒として実施した。また, 調定率の倍率 ε とファジー制御器の調整パラメータは, 全地域いっせいに基準外乱[0.01(P.U.MW)のステップ状外乱。]を発生させ, 適応度として(19)式を用い, 乱数の初期値 $b_o = 3$, 突然変異率 $M_r = 1.5$ (%), 個体数 $d = 2.0$ (個体)としてGAを用いて設計した。

なお, GAを実施する場合, 調定率の倍率 ε の範囲は, 発電所のタービン・ボイラー等を考慮し1.0~2.0とし, D_{ri} と η_i の範囲は, ファジー制御器の制御操作量を小さくするために, 各々0.0~1.0と0.0~0.01とした。 S_{ri} は, 周波数偏差に存在する雑音などの影響を考慮し1.0~2.0とし, α_i は位相平面上のファジー制御領域を考慮し0.0~90.0°の各範囲とした。そして, 各々8等分して, 2進数3ビットで表現した。

表1. 使用定数

Table.1 System constants.

$M_1=0.200$ (P.U. MWS/Hz)	$M_2=0.166$ (P.U. MWS/Hz)
$M_3=0.150$ (P.U. MWS/Hz)	$D_1=0.0060$ (P.U. MW/Hz)
$D_2=0.0083$ (P.U. MW/Hz)	$D_3=0.0020$ (P.U. MW/Hz)
$T_{N11}=0.25$ (s)	$T_{R11}=0.25$ (s)
$T_{N12}=0.30$ (s)	$T_{R12}=0.30$ (s)
$T_{N13}=0.25$ (s)	$T_{R13}=0.25$ (s)
$T_{Rr1}=10.0$ (s)	$T_{Rr2}=10.0$ (s)
$T_{RE2}=0.8$ (s)	$T_{RE3}=1.0$ (s)
$T_{RE3}=2.0$ (s)	$T_{RE1}=2.0$ (s)
$K_{Rr1}=0.5$	$K_{Rr2}=0.5$
$K_{RrE1}=0.5$	$K_{RrE2}=0.5$
$P_{i\alpha 12max}=0.050$ (P.U. MW)	$P_{i\alpha 23max}=0.050$ (P.U. MW)
$\delta_{12}=\pi/6$ (rad)	$\delta_{23}=\pi/6$ (rad)
$a_{12}=2.0$	$a_{23}=5.0$ ($i=1, 2, 3$)

表2. 調定率の倍率 ε とファジー制御器の調整パラメータ
Table.2 ε and tuning parameters.

$D_{r1}=0.125$	$D_{r2}=0.125$	$D_{r3}=0.125$	$\eta_1=0.010$
$\eta_2=0.010$	$\eta_3=0.010$	$\alpha_1=11.25^\circ$	$\alpha_2=11.25^\circ$
$\alpha_3=11.25^\circ$	$S_{f1}=2.00$	$S_{f2}=2.00$	$S_{f3}=1.75$
$\varepsilon=1.875$			

なお、ファジー制御操作量の不感帯を表す D_{b1} は、 D_{r1} の3%とし、スイッチングラインSLは、 $\gamma_1=135.0^\circ$ 、 315.0° とした。

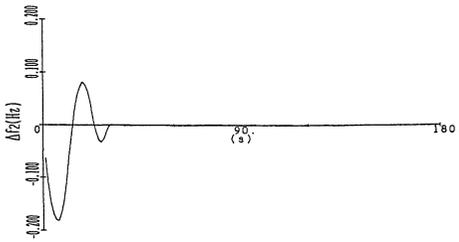
表2は、これらを用いて設計した結果である。

4.1 基準外乱が発生した場合

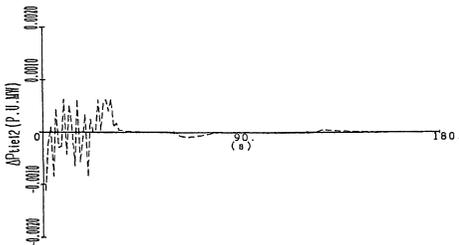
図3は本制御手法、図4は比較のために用いた従来法でLFC発電所で連続形のTBC（付録I参照）、EDCで本制御手法と同じ逐次最小二乗法を用いた場合（以下本論文では従来法と呼ぶ。）である。図3と図4は、図1のモデルシステムに対して基準外乱が、全地域でいっせいに発生した場合の地域2の応答特性で、(a)は周波数偏差 Δf_2 、(b)は地域1-2間の連系線潮流偏差

ΔP_{11e12} 、(c)は各々非再熱・再熱LFC発電所の出力偏差 ΔP_{N12} 、 ΔP_{R12} および再熱EDC発電所の出力偏差 ΔP_{EDC2} である。ここで、EDCは60秒先の需要変動を予測し、60秒ごとに出力を修正している。

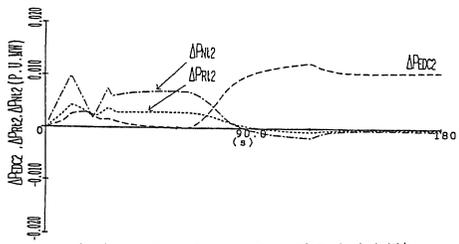
図3、図4を各々比較すると、本制御手法の Δf_2 は約40秒で収束し、図4の従来法の場合は収束するまで約100秒かかっており、本制御手法が有効に作用していることがわかる。また、 ΔP_{11e12} においても本制御手法を実施した場合には、EDC発電所の制御操作量に変更した60、120秒に極めて微小な揺れが存在するが、従来法よりも際立って良好な特性である。また、次に各発電所の出力偏差に注目してみると、本制御手法の ΔP_{N12} 、 ΔP_{R12} は、約40秒後速やかに目標値に到達し、従来法と比較して振動が少ない。そして、EDC発電所が60秒後から外乱を追従してくると速やかにLFC発電所の出力偏差がなくなり、LFCとEDCとの協調が従来法よりも良好であることがわかる。



(a) 地域2の周波数偏差



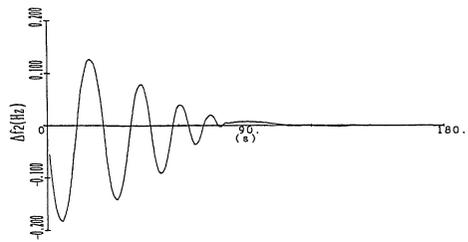
(b) 地域1-2の連系線潮流偏差



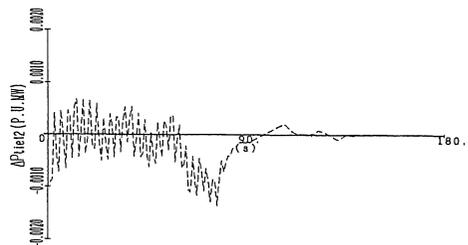
(c) 地域2の各発電所の出力偏差

図3 本制御手法を実施した場合

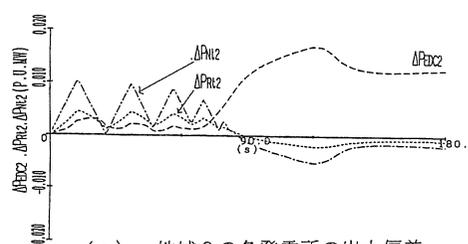
Fig.3 Responses of proposed control.



(a) 地域2の周波数偏差



(b) 地域1-2の連系線潮流偏差



(c) 地域2の各発電所の出力偏差

図4 従来法を実施した場合

Fig.4 Responses of conventional control.

4.2 ランダム外乱が発生した場合

実際の電力需要は、ステップ状の外乱でなく、時々刻々変化するランダム外乱である。本論文では、一次の自己回帰式を用いて時間の経過と共に増加する需要変動であるランダム外乱⁽¹²⁾ (付録Ⅱ参照)を想定し、より実際に近い状況においてのシミュレーションを実施し検討する。

図5, 図6は、そのランダム外乱が各地域いっせいに発生した場合の、地域2の応答特性である。各々(a)は Δf_2 , (b)は ΔP_{LFC10} , (c)は ΔP_{N12} と ΔP_{R12} である。また(d)は ΔP_{EDC2} と地域2に発生させたランダム外乱 ΔP_{d2} である。図5は表2の ε と調整パラメータを用い、本制御手法を実施した場合、図6は従来法を実施した場合である。ここで、本制御手法と従来法とを比較するために、次に示す時間項を考慮していない評価関数を用い

る。すなわち、 J_{fr} は周波数偏差だけの評価関数、 J_{pr} は連系線潮流偏差だけの評価関数、 J_{LFC10} は、 ΔP_{N11} と ΔP_{R11} の和を取りLFC発電所の出力偏差の総和量を表している。 J_{EDC10} はEDC発電所の出力偏差量を示す評価関数であり、 J_{EP10} は ΔP_{EDC1} と ΔP_{d1} との差を示す評価関数を用いて各々評価する。

$$J_{pr} = J_{r1} + J_{r2} + J_{r3} \quad \dots (20)$$

$$J_{fr} = \sum_{k_d=0}^h \left\{ \sum_{i=1}^3 |\Delta f_i(k_d)| \right\} \quad \dots (21)$$

$$J_{r1} = \sum_{k_d=0}^h |\Delta P_{LFC10}(k_d)|$$

$$J_{r2} = \sum_{k_d=0}^h (|a_{12} \Delta P_{LFC12}(k_d)| + |a_{23} \Delta P_{LFC23}(k_d)|)$$

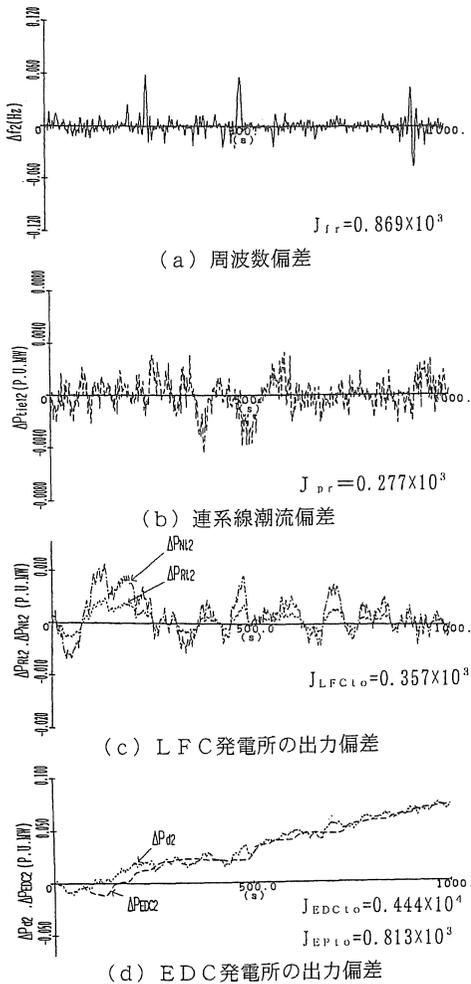


図5 ランダム外乱が発生した場合の本手法
Fig.5 Responses of proposed control in case of random disturbances.

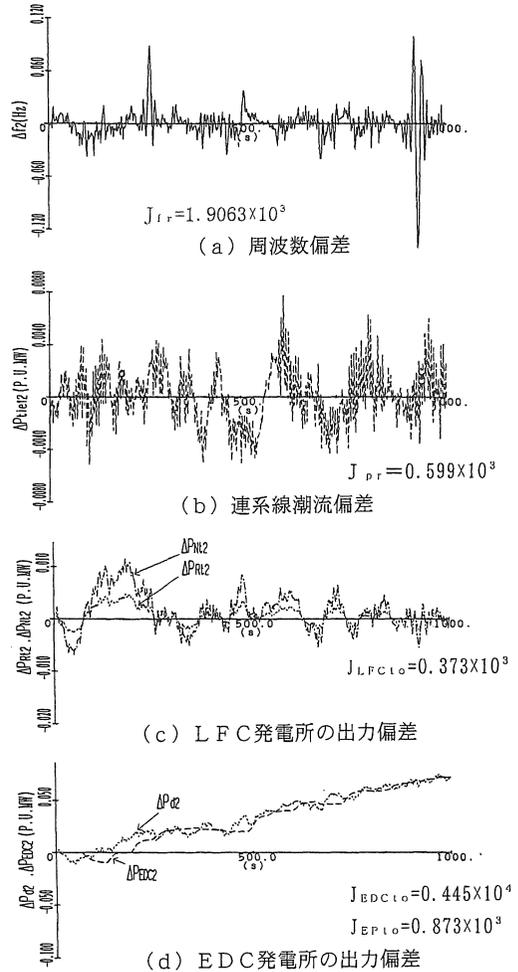


図6 ランダム外乱が発生した場合の従来法
Fig.6 Responses of conventional control in case of random disturbances.

$$J_{r3} = \sum_{k_d=0}^h | \Delta P_{i.e.23}(k_d) | \dots (22)$$

$$J_{LFC10} = \sum_{k_d=0}^h \{ \sum_{i=1}^3 (\Delta P_{N1i}(k_d) + \Delta P_{R1i}(k_d)) \} \dots (23)$$

$$J_{EDC10} = \sum_{k_d=0}^h \{ \sum_{i=1}^3 \Delta P_{EDCi}(k_d) \} \dots (24)$$

$$J_{EP10} = \sum_{k_d=0}^h \{ \sum_{i=1}^3 | \Delta P_{EDCi}(k_d) - \Delta P_{di}(k_d) | \} \dots (25)$$

図5と図6を比較すると、本制御手法の Δf_2 は、各地域いっせいにランダム外乱が発生しているにもかかわらず、従来法よりも最大振幅を抑制でき、 J_{r3} において約1/2に改善しており良好な特性である。また、同様に、本制御手法の $\Delta P_{i.e.12}$ は、従来法に比べ全体的に振幅を抑制し、 J_{pr} において約1/2に改善している良好な特性である。 J_{LFC10} は、本制御手法と従来法を比較すると、本制御手法が若干小さくなっている。ここで、 J_{EDC10} において、本制御手法は、従来法とほぼ同じ大きさであるにもかかわらず、周波数偏差や連系線潮流偏差を従来法よりも抑制していることがわかる。また、 J_{EP10} において本制御手法は、約6.8%従来法よりも小さくなっており、従来法よりも外乱を正確に追従していることがわかる。

これらの結果、本制御手法は、従来法よりもLFCとEDCとを良好に振動も少なく協調させることができる。特に、周波数偏差や連系線潮流偏差を抑制する有効な自動発電制御であることがわかる。

5. 結論

本論文では、逐次最小二乗法による予測制御からなるEDCに対して、全系で協調を図りながらGAで一括設計し、ファジー形負荷周波数制御を実施する新しい自動発電制御を提案した。そして、3地域くし形AGCモデルを用いて、提案する自動発電制御の有効性を明らかにした。

その結果、次のような成果を得た。

- (I) 本制御手法は、EDCに対して最適にLFCを協調させることができた。
- (II) 従来法よりも周波数偏差と連系線潮流偏差を約1/2に改善でき、収束性を高めることができた。
- (III) 提案する手法はランダム外乱に対しても十分対応できた。
- (IV) 実用的なサンプル周期と演算時間遅れを1サンプル考慮しており、実現可能なオンラインAGC体系となっていることを明らかにした。
- (V) GAを用いているので、ファジー制御器の調整

パラメータと調定率の実用範囲での最適化を一括して全系で設計することができ、パラメータの調整時間が短縮できた。

文 献

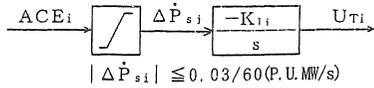
- (1) 電力系統の備給制御技術専門委員会：「電力系統の備給制御技術」、電気学会、電気学会技術報告(II)部、第302号、1989
- (2) Nasser Jaleeli, Louis S. Van Slyck, Donald N. Ewart Lester and H. Fink: "UNDERSTANDING AUTOMATIC GENERATION CONTROL"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7 No. 3, pp. 1106-1122, August 1992
- (3) 宮田：「電力系統の計画と運用」、電気書院、1970
- (4) 吉田、嵯島、加藤、廣政、佐伯：「短周期需給制御システムの性能向上」、電気学会電力技術研究会、PE-95-38、1995
- (5) 雪田、後藤、水谷：「負荷推定と調定率の調整効果を考慮したファジー制御を用いた負荷開放制御」、電学論B, Vol. 116-B, No. 1, pp. 42-51, 1996
- (6) 中澤：「システム同定と信号解析」、コロナ社、1988
- (7) 白井、菅原、竹内：「EDCとLFCの協調による分散形の自動発電制御」、電学論B, Vol. 113-B, No. 12, pp. 1371-1380, 1993
- (8) LEON K. KIRCHMAYER: "ECONOMIC OPERATION OF POWER SYSTEMS", JHON WILEY & SONS, INC., 1958
- (9) 雪田、水谷：「高速GAを用いたファジー形負荷開放制御のための調整パラメータ決定手法」、電学論 B, Vol. 116-B, No. 2, pp. 211-217, 1996
- (10) 興根：「電力系統過渡解析」、オーム社、1980
- (11) 村上、伊藤：「電気調速機の構造と取り扱い」、電気書院
- (12) 八名、白井：「電力系統における負荷変動の統計的モデル」、電学論, B, Vol. 111-B, pp. 570-571, 1991

付 録

I. 本論文で用いた従来法 本制御手法と比較のために用いた従来法は、まずLFC発電所でTBCを、EDC発電所では本制御手法と全く同じ手法を実施した。ここで、付図1は、本制御手法と比較するために用いた従来のTBCの構成線図である。付図1の地域制御誤差ACE_iの増加率制限は、再熱LFC発電所と同じ値に設定し、積分利得K_{ii}と調定率の倍率εは、〈3.3〉節と同様に次式の評価関数を用いて、GAで設計した。この従来のTBCを実施したときのK_{ii}の設計結果を付表1に示す。

$$J_i = \sum_{k_d=0}^h (| \Delta f_i(k_d) | + \sum_{n=1}^{s_i} | a_n \Delta P_{i.e.in}(k_d) |) \times t_k^2 \dots (付. 1)$$

$$J_{i0} = \sum_{i=1}^l J_i \dots (付. 2)$$



K_{ii} はTBCの積分ゲイン, U_{Ti} は制御操作量,
 ACE_i は地域制御誤差。

付図. 1 TBCの構成図

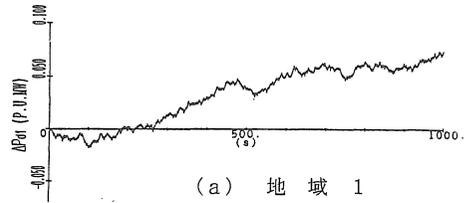
app.Fig.1 Block diagram of TBC.

付表1. 積分ゲインと ϵ の設計結果

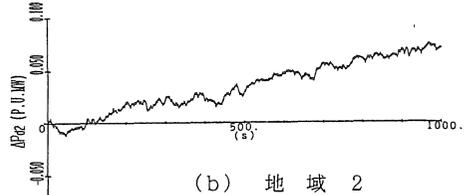
app.Table.1 The gains of integral and ϵ .

$K_{11}=0.750$	$K_{12}=0.650$	$K_{13}=0.500$	$\epsilon=2.0$
----------------	----------------	----------------	----------------

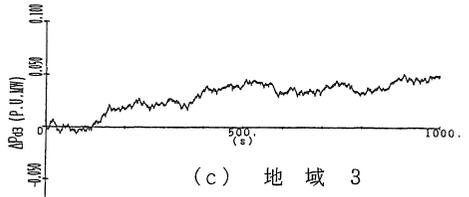
II. ランダム外乱 付図2は, 本論文で各地域に与えたランダム外乱で, 文献(12)に基づき需要(負荷)変動を一次の自己回帰式としてシミュレーションを実施し作成した。ただし, 正規乱数の標準偏差は, 6.0×10^{-4} とした。



(a) 地域 1



(b) 地域 2



(c) 地域 3

付図2 ランダム外乱

app.2.Fig.2. Random disturbances.

(受理 平成11年3月20日)