EDC と LFC の協調による分散形の 自動発電制御

正 員 白 井 五 郎 (法政大)

准 員 沓 掛 政 志 (法政大)

正 員 竹 内 茂 (法政大)

Decentralized Automatic Generation Control Coordinating EDC and LFC

Goro Shirai, Member, Masashi Kutsukake, Associate, Shigeru Takeuchi, Member (Hosei University)

This paper describes a unified automatic generation control (AGC) scheme coordinating EDC (Economical Load Dispatching Control) and LFC (Load Frequency Control). So far, in absorption of the load fluctuations occurring on power systems, both of EDC and LFC systems have been considered separately each other. By coordinating both control systems, undesirable system behaviours are avoided. The responses of frequency deviation, turbine power fluctuation and tie-line power flow deviation are smoothed using the proposed AGC scheme.

The background theory is based on servo-type optimal control theory. The structure of the proposed control method is a decentralized type. So, the implementation in multi-area power systems is easy.

The effectiveness of the proposed unified AGC is illustrated by an example, and the simulation results on three-area power systems show that the method is encouraging. In this paper, some of the problems associated with the application of this method to the multi-area AGC are discussed.

キーワード：自動発電制御，負荷周波数制御，経済負荷配分制御，分散形制御，需要推定，スペクトル密度

1. ま え が き

電力系統の需給運用技術は絶えず変動している負荷需要に対して供給電力を常にバランスさせ、かつ最経済運用となるように各発電機出力を調整する制御技術であるといわれている^{(1)~(3)}。これらの制御にかかわっているのは経済負荷配分制御(Economical Load Dispatching Control; EDC)と負荷周波数制御(Load Frequency Control; LFC)である。これをもう少し詳しく調べてみると前日の需給計画と当日の需給運用の二つに分けられる。前日の需給計画では翌日の1日の周期で変動する需要変動の大きさを予測し、可能供給電力(自社の水力、火力、原子力など)および他社と

の融通電力計画を勘案し、前日のうちに翌日の最経済運用計画を決定する。次に当日の運用にあたっては前日の予想をベースとしながらも、より円滑な需給運用および適正なオンライン EDCを行うために再び経済運用の計算を行う。このようにしても、実際の運用においては時々刻々と変化する総需要電力と総発電電力がバランスせず、いくらかの発電電力の調整が必要になる。すなわち、LFC 発電所出力の調整が求められる。

本論文では、このような需給制御問題のうち、主として後者の当日の需給制御である EDC と LFC の問題を取り扱う。当日の総需要電力と総発電電力の需給バランスを保つ LFC と EDC は電力システムの品質

を維持し、かつ経済性を図る二つの重要な需給制御である。LFCの対象とする需要変動の大きさは1~2%で、その周期は0.5分から十数分程度といわれている。一方、EDCのそれは前述のように1日の周期で変化する需要変動を対象にしつつ、当日のEDCは短周期的には5~20分程度と思われる。最近ではより経済的な需給運用を目標とし、かつその制御の質的向上を目指してEDCの対象とする需要変動の周期は更に短くなる傾向にあり、EDCとLFCを統一的に取り扱う自動発電制御(Automatic Generation Control; AGC)へと関心が移っている^{(4)~(7)}。

著者らも、これらの制御を統一的に取り扱うAGCについて積分形最適制御理論の立場から検討を進めてきた⁽⁸⁾。積分形最適制御理論をベースとした集中形AGCは、理論的な安定性、最適性は保証されるが、集中形のため他地域のデータを必要とし、伝送線が複雑となり、実施が難しい。本論文は、実用性を目指し分散形制御方式を主体としたAGCの確立について述べたものである。本論文で扱うEDCは、例えば等増分燃料費法などの経済運用計算を具体的に行うのではなく、最適負荷配分についての計算は既に行われたものとし、その信号に追従するように需給調整を行うものである⁽⁹⁾。以下では本手法の基礎的理論、用いた分散形制御方式ならびにモデルシステムについてランダムな需要変動に対する提案する手法の応答特性を示し、その有用性について検討する。

2. 自動発電制御方式

EDCとLFCの自動発電制御方式については種々の形があるが、この論文では図1に示された並列形配分方式を用いる⁽²⁾。この方式はLFCが短周期成分の需要変動を、EDCが長周期成分のそれを吸収する方式である。提案するAGCでは時々刻々と変化している需要電力に対して過去のデータを用いて先の時点での負荷予測を行い、その予測値をEDC発電所への出力指令値としている。従って、LFCは実際の電力需要

図1 並列形配分方式

Fig.1. Parallel load dispatching control scheme.

と予測したEDC発電所の出力との差を吸収することとなる。本論文ではこのEDCとLFCの二つの出力指令信号を従来のように別々にEDCとLFC発電所へ伝送するのではなく、積分形最適制御理論の下で統一して伝送し、制御効果の改善を目指している。

3. 理論的基礎⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

本論文で提案する分散形AGCは積分形最適制御理論をベースとしている。EDCおよびLFCで対象としている需要変動はあまり大幅でないと仮定すれば、次の線形微分方程式および観測方程式で表すことができる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Delta Pd \quad (1)$$

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

ここで、 x : n 次元状態ベクトル、 u : m 次元制御ベクトル、 ΔPd : n 次元外乱ベクトル、 y : p 次元観測ベクトル

であり、 A, B, C はそれぞれ適当な次元の係数行列であり、ステップ外乱などのオフセットを残す外乱に対しては図2に示されているように、積分器を導入して、需給制御の目的を果たす必要がある。同図で r はEDC発電所が追求すべき目標値である。ここで、 K, F は安定化と最適化のための設計パラメータである。そのとき、図2の閉ループ系は

$$u = -Fx + z \quad (3)$$

$$\dot{z} = K(r - y) \quad (4)$$

となる。 x と u を状態変数にとり、(1)、(3)式を連立させると次式を得る。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_n & 0 \\ -F & -K \end{pmatrix} E \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ K \end{pmatrix} r + \begin{pmatrix} 1 \\ -F \end{pmatrix} \Delta Pd \quad (5)$$

ここで、

図2 積分形最適制御の構成図

Fig.2. Block diagram of integral type optimal control.

$$E = \begin{pmatrix} A & B \\ C & 0 \end{pmatrix} \left\{ \dots \dots \dots (6) \right.$$

$$\det[E] \neq 0$$

いま、需要変動発生後の定常値を x_e , u_e とし、 x , u からの偏差値 $X = x - x_e$, $U = u - u_e$, $e = r - y$ とすると(5)式は

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{U} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ U \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ I_m \end{pmatrix} V \dots \dots \dots (7)$$

$$e = -CX \dots \dots \dots (8)$$

の閉ループ系に

$$V = -(F \quad K)E \begin{pmatrix} X \\ U \end{pmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

の状態フィードバックを施したものとなる。(7)式に対して正常の重み行列 W , R を用いた評価関数

$$J = \int_0^\infty (e^T W e + V^T R V) dt \dots \dots \dots (10)$$

を導入したとき(10)式を最小化する(7)式的最適フィードバックゲイン $(F \quad K)$ はよく知られているリカッチ行列

$$\begin{pmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{pmatrix}^T P + P \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{pmatrix} - P \begin{pmatrix} 0 \\ I_m \end{pmatrix} R^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ I_m \end{pmatrix}^T P + C^T W C = 0 \dots \dots \dots (11)$$

の解として求められる。(11)式の解 P より(10)式的最適フィードバックゲイン $\tilde{F}$ は

$$\tilde{F} = -R^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ I_m \end{pmatrix}^T P \dots \dots \dots (12)$$

これが(9)式と一致するので

$$(F, K) = \tilde{F} \cdot E^{-1} \dots \dots \dots (13)$$

として F, K が求められる。

本論文で対象としている需要変動はランダム変動であるので、ここで述べた基礎理論との関係についていくらかの検討が必要である。ここで述べた基礎理論では外乱は一定値と仮定しているの、ランダム外乱に対しては厳密な意味ではこの理論は当てはまらない。しかしながら、ランダム外乱を時間間隔の短い方形波の集まりと考え、かつ速やかに制御が実行されるとすれば上述の理論は成り立つ。本研究ではこのような仮定の下で以下に述べるランダムな需要変動に対応することとする。この考え方の有用性は以下の数値シミュレーションで確認する。

4. 提案する分散形制御方式

現行の電力システムは、独立した運用体系をとった個々の会社が互いに協調を保ちながら大連系系統とし

図3 分割化されたフィードバックゲインの構造

Fig. 3. Structure of decomposed feedback gains.

て運用されている。従来、個々の会社は需給制御を実施するにあたり、自地域内の発電所群および負荷群の結合は会社間の連系線に比べて密であるという立場から、周波数偏倚連系線潮流制御(Tie Line Bias Control; TBC), 定周波数制御(Flat Frequency Control; FFC)として知られている需給制御を行ってきた⁽¹⁾。

会社間を結び付けている連系線があまり強くなければ、他地域に属する状態量は対象サブシステムの動特性に及ぼす影響は少ない⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。本論文はこのような前提で、連系系統を構成している各電力会社は自地域で生ずる需給変動を吸収するのに自社内で得られる観測データだけを用い、需要変動を吸収する分散形の需給制御方式を構築する。

この方式は、(1)式のシステム全体を表示する集中形の状態方程式から前章の積分形最適理論により得られた最適ゲインを、図3のように斜線の部分だけを残すことに対応する。実際に種々の運転条件について、集中形の積分形最適制御によって求めたフィードバックゲインを調べてみると、他地域に属するフィードバックゲインの値は自地域の値に比べてかなり小さいことが確認されている⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。現行のTBCも、このように自地域から観測できるデータを用いて分散形の需給制御を構成している。本方式でもTBCと同様に、連系線潮流は隣接する両地域で重複して観測することとする。これは自地域で生じた負荷変動は自地域の発電所で吸収するためである。

5. モデルシステムおよび需要変動

〈5・1〉 モデルシステム 提案する手法の有用性を調べるため、図4のモデルシステムについて検討することとする。モデルシステムはくし形の3地域より構成されており、容量比は5:10:2である。

このモデルの原形は文献(1)に基づく。ここでは、より実際のシステムに近い状況での応答を調べるため、各地域は3台の発電機より構成されており、1台はLFC調整用発電所として、残りの2台はEDC発電所とした場合である。(1), (2)式の状態変数ベク

トルおよび操作変数ベクトルは次のとおりである。

状態変数ベクトルは

$$x = [\Delta f_1, \Delta P_{t11}, \Delta P_{g11}, \Delta P_{r11}, \Delta P_{t12}, \Delta P_{g12}, \Delta P_{r12}, \Delta P_{t13}, \Delta P_{g13}, \Delta P_{r13}, \Delta P_{t12}, \Delta f_2, \Delta P_{t21}, \Delta P_{g21}, \Delta P_{r21}, \Delta P_{t22}, \Delta P_{g22}, \Delta P_{r22}, \Delta P_{t23}, \Delta P_{g23}, \Delta P_{r23}, \Delta P_{t23}, \Delta f_3, \Delta P_{t31}, \Delta P_{g31}, \Delta P_{r31}, \Delta P_{t32}, \Delta P_{g32}, \Delta P_{r32}, \Delta P_{t33}, \Delta P_{g33}, \Delta P_{r33}]^T$$

操作変数ベクトルは

$$u = [\Delta P_{c11}, \Delta P_{c12}, \Delta P_{c21}, \Delta P_{c22}, \Delta P_{c31}, \Delta P_{c32}]^T$$

添字“T”：転置行列

とする。

ここで、それぞれの状態量は

- Δf_i ：各地域の基準周波数からの周波数偏差
- $\Delta P_{t_{ij}}$ ：基準値からのタービン出力偏差
- $\Delta P_{g_{ij}}$ ：基準値からのガバナ出力偏差
- $\Delta P_{r_{ij}}$ ：基準値からのリヒート出力偏差
- ΔP_{di} ：需要変動の大きさ

添字 $i=1, 2, 3$ は各地域を示し、 $j=1, 2, 3$ は各地域内のそれぞれのタービン、ガバナ、リヒータを示して

図 4 3地域くし形連系システムモデル

Fig. 4. 3 area longitudinal interconnected power systems.

いる。

ΔP_{tie12} , ΔP_{tie23} は地域 1-2 および 2-3 間の基準値からの連系線潮流を示している。

また、操作量は

ΔP_{cij} ：调速機速度調整装置の基準値からの偏差

添字 $i=1, 2, 3$ は各地域を示し、 $j=1$ は LFC 信号を、 $j=2, 3$ は EDC 信号を示す。

図 5 の構成図中の各定数は

- H_i ：単位慣性定数 (S)
- D_i ：負荷の周波数特性定数 (puMW/Hz)
- R_i ：調定率 (Hz/puMW)
- α_i ：負荷配分係数
- T_{ti} ：タービンの時定数 (S)
- T_{gi} ：ガバナ開度時定数 (S)
- T_{ri} ：リヒートタービンの時定数 (S)
- f^* ：基準周波数 (Hz)

添字 $i=1, 2, 3$ は各地域を示し、 $j=1, 2, 3$ は各地域内のそれぞれのタービン、ガバナ、リヒータを示している。

a_{12} は系統容量換算比である。また、 T_{12} は基準運転における地域 1-2 間の同期化係数 (puMW/Hz) である。

また、本研究で用いた使用定数を表 1 に示す。

〈5・2〉 LFC および EDC 信号の設定 本研究では、LFC 信号は地域制御誤差 ACE (Area Control Error: $ACE = B_i \Delta f_i + \Delta P_{tie_{ij}}$, ここで B_i は周波数バイアス値で、 $B_i = D_i + 1/R_i$ で与えられる) を用いて TBC の概念を含めるように観測行列 C の各要素を決める。すなわち LFC の場合は、地域 1 についての観測行列 C_1 は状態変数ベクトル x の地域 1 に対する要素から

図 5 地域 1 のブロック線図

Fig. 5. Block diagram of area 1.

表 1 使用定数

Table 1. Used system Parameter values.

Area:				
	j	1	2	3
H_i		6	5	4.5
D_i		0.006	0.00833	0.008
T_{ti}	1	0.25	0.3	0.25
	2	2.0	2.0	2.0
	3	2.5	2.5	2.5
T_{gi}	1	0.1	0.08	0.1
	2	1.0	0.8	1.0
	3	1.2	1.0	1.2
T_{ri}	1	4.0	4.0	4.0
	2	6.0	6.0	6.0
	3	6.5	6.5	6.5
$a_{12}=2.0$		$a_{23}=5.0$		
$T_{12}=0.272$		$T_{23}=0.109$		(puMW/Hz)
$f^*=60$				(Hz)

$$C_i = (B_i, 0, 0, \dots, 0, 1) \times (\Delta f_i, \Delta P_{t1i}, \Delta P_{g1i}, \dots, \Delta P_{tie12})^T \quad (14)$$

となる。他の地域も同様である。また EDC 信号に対しては、各地域のタービン出力が必要変動予測より決められる目標値 r に追従するように(2)式の観測行列 C の要素の値を設定する。

〈5・3〉 需要変動の模擬 電力システムの需要変動は時々刻々と変化し、複雑な様相を呈するが、文献(1)によると EDC と LFC が対象とする需要変動はおおむね次のスペクトルで近似できるとされている⁽¹⁾。

$$S(\omega) = A/\omega^m \quad (15)$$

ここで、 A : 定数, ω : 周波数, $m: 2$

このスペクトルをもつ需要変動の模擬については文献(15)の方法によった。

〈5・4〉 需要変動の予測 本方式による EDC を実施するためには、先の時点での電力需要変動を予測する必要がある。需要変動の予測には種々の方法があり、その一つとして文献(16)の方法があるが、増加率制約に掛かるような需要変動に対しては対象システムの線形性が失われ、需要変動の予測が困難になる。そこで本論文では、各地域の需要電力が図6に示されているように自地域の発電機出力、ならびに隣接地域からの連系線潮流によってまかなわれることに注目し、これらの測定値をもとに需要電力を予測する⁽¹⁷⁾。

図6においては地域 i 内の発電所の個数が s であることを示し、 L_1, L_2 は負荷を示している。連系されて

図 6 各地域の供給電力と連系線潮流の測定
Fig.6. Prediction method of demand powers.

図 7 需要変動の予測法

Fig. 7. Prediction method of demand powers.

いる地域は図では二つの地域のみである。一般的には i 地域の時刻 t における発電電力の総和 $G_T(t)$ は、

$$G_T(t) = \sum_{j=1}^s G_j + \sum_{m=1}^t P_{tieim} \quad (16)$$

ここで、 G_i : i 地域内の個々の発電機出力、
 s : その総数, P_{tieim} : i 地域と隣接地域の間の連系線潮流, t : 隣接地域の数

(16)式で測定された発電機出力を総需要電力の予測値として使うと EDC に適さない微小な需要変動分に追従するため、本研究では、EDC 発電所が微小変動に追従しないよう適当な時間間隔ごとに最小二乗法でデータの平滑化を行っている。

図7は本論文で用いた予測方法を図的に示したものである。すなわち、過去の実績値を(16)式により、サンプリング間隔 0.1 秒で測定し、需要変動の予測値を最小二乗法で近似している。ここでは直線近似で予測する。すなわち、時系列データ x_t が

$$x_t = a + bt \quad (17)$$

に従うものとする。このときの個々の観測データを $x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t-m+1}$ とするとき、 $\hat{x}_{t+t} = \hat{a}_t + \hat{b}_t t$ ($t = 0, \dots, -m+1$) との差の二乗の和を最小にする $\hat{a}_t, \hat{b}_t$ を決め、需要変動の予測を行っている。

〈5・5〉 増加率制約の導入 朝・夕の需要電力が急

図 8 増加率制約の導入機構
Fig. 8. Structure of generation rate constraints.

激に変化するときには EDC または LFC は出力の増加率制約にかかる可能性があるため、増加率制約を考慮する必要がある。本研究では、図 8 のような制約を数値シミュレーションにおいて考慮している。この図でガバナ開度の変化可能限界値は、

$$|\Delta P_g| \leq 0.1 \text{ puMW/s}$$

またタービンの出力変化制限として、

$$|\Delta P_t| \leq 0.05 \text{ puMW/min}$$

をつけ、中央給電指令所からの信号にはタービン増加率を考慮して、同じ大きさの増加率制約を掛けた⁽¹⁸⁾。

6. 応答特性の検討

提案する AGC の有用性を示すために、スペクトル密度が(15)式で表される需要変動に対して数値シミュレーションを行う。

まず、需要変動の周期をいくらに選ぶかということであるが、EDC と LFC が対象としている需要変動の周期は冒頭でも述べたように、EDC は 5～20 分程度、LFC は 0.5～十数分程度と思われるので、両方合わせた周期として、本研究では 15 分を中心周期とした。

次に、EDC、LFC の応答の早さを決める積分ゲインの大きさであるが、現状では 0.05～0.5 程度であると思われるが、ボイラ、タービンの応答性能も最近では向上しているので 1.2 程度まで変化させ応答特性を調べることにした。積分ゲインの大きさは、第 3 章の(10)式で決まる重み調整によって容易に求まる。需要変動の大きさについては、文献(19)によると定常時に

図 9 電力システムの需要変動
Fig. 9. Load fluctuations in power systems.

は 0.005 puMW/min、朝夕の急激に変化する時間帯で 0.02 puMW/min を超えないといわれているので、このあたりを変動の上限値と考えて図 9 に示された需要変動を発生させた。

この需要変動曲線からわかるように負荷の変化率は 0.02 puMW/min を超えている部分もあり、かなり大きな需要変化と考えられる。

図 10(a) は中心周期が 15 分で、積分ゲインが 0.5 とした場合の提案する AGC の周波数変動、連系線潮流偏差、LFC 発電所および EDC 発電所 1 の応答である。ここで、EDC 発電所 1 と 2 への出力負荷配分係数は 2 : 1 で、増加率制約は〈5・5〉節の値がつけてある。図では各地域のそれぞれの周波数変動は重ねて示した。また、需要変動の予測時間は 10 秒とした。

(b) 図は TBC の場合で、増加率は提案する AGC のように 0.05 puMW/min とすると不安定になるので、0.5 puMW/min とした。これらの応答からわかるように、提案する AGC は周波数変動、連系線潮流偏差に関して TBC の場合より変動幅は小さく、良好な応答を示している。EDC 発電所 1 のタービン出力については提案する AGC は需要変動が大きいため、増加率制約に掛かりながら需要変動に追従している。LFC 発電所はより速い需要変動分に対して増加率制約に掛かりながら、EDC 発電所 1 と同様に需要変動に追従している。

一方、TBC は提案する AGC に比べて EDC 発電所および LFC 発電所の出力は小刻みに頻繁に変動し、周波数偏差、連系線潮流偏差が提案する AGC に比べて大きい。

図 11 は図 10(a) と同じ条件で予測時間だけを 30 秒としたときの提案する AGC の応答である。この場合は(a)図の場合に比べて LFC 発電所出力ならびに EDC 発電所出力が大きく変動し、振動的な応答となっている。両図より予測時間が長くなっても、周波数

図 10 提案する AGC および TBC の応答特性
(積分ゲイン $\gamma=0.5$, 推定時間 10 秒の場合)
Fig. 10. Responses of the proposed AGC
and the TBC (integral gain $K_I=0.5$, predic-
tion time = 10 s).

図 11 提案する AGC の応答特性 (積分
ゲイン $\gamma=0.5$, 推定時間 30 秒)
Fig. 11. Responses of the proposed AGC
(integral gain $K_I=0.5$, prediction time
= 30 s).

図 12 提案する AGC の応答特性 (積分ゲイン 1.2, 推定時間 10 秒)

Fig. 12. Responses of the proposed AGC (integral gain $K_I=1.2$, prediction time =10 s).

図 13 提案する AGC の応答特性 (積分ゲイン 1.2, 推定時間 30 秒)

Fig. 13. Responses of the proposed AGC (integral gain $K_I=1.2$, prediction time =30 s).

図 14 提案する AGC の応答特性 (積分ゲイン 1.2, 推定時間 1 分)

Fig. 14. Responses of the proposed AGC (integral gain $K_I=1.2$, prediction time =1 min).

図 15 提案する AGC の応答特性(積分ゲイン 0.1, 推定時間 10 秒)

Fig. 15. Responses of the proposed AGC (integral gain $K_i=0.1$, prediction time $=10$ s).

偏差, 連系線潮流偏差はあまり変わらない。しかしながら, EDC は図 9 の需要変動に遅れることなく追従すべきであるが, 需要推定時間が長くなると図 11 の地域 2 の EDC 1 の出力変動は, 需要推定時間が 10 秒の場合よりやや上下に大きく変化している。需要推定時間が長くなると, 需要変動への追従が遅れ EDC および LFC 発電所出力が大きく変化し, むだな動作が目立つ。これは, 需要変動の予測時間が長くなると, その間で需要変動が大きいと予測誤差も大きくなり, 実際に生じている需要変動の大きさとそれを吸収するための EDC 発電所出力の大きさととの偏差分が増加し, LFC 発電所の負担分がそれに応じて増したためと考えられる。需要予測の精度を向上させることの重要性を示している。

図 12 は需要変動の予測時間を 10 秒とし, 積分ゲインを 1.2 とした場合である。周波数変動, 連系線潮流偏差は積分ゲイン 0.5 に比べて更に小さく, 良好に抑

制されている。タービン出力は増加率制約に掛かるため, のこぎり状に変化しているが, 安定性には問題ない。提案する AGC の場合, 積分ゲインを大きくすると周波数変動, 連系線潮流偏差を効果的に抑制することができるといえる。TBC では 1.2 の積分ゲインでは安定性は保てなかった⁽²¹⁾。

図 13 および図 14 は, 図 12 と同じ条件で予測時間だけをそれぞれ 30 秒, 1 分とした場合である。予測時間を 30 秒, 1 分としても周波数偏差, 連系線潮流偏差は予測時間 10 秒の場合に比べて応答特性はほとんど変わらない。しかしながら, EDC 発電所出力および LFC 発電所の出力は積分ゲイン 0.5, 予測時間 30 秒のときと同様にいずれも大きく変動している。予測時間 1 分のほうが需要変動に対して 30 秒の場合より追従が遅れ, 480 秒以降の定常状態では LFC 発電出力変動幅がやや大きく, いずれも, 予測時間 30 秒以上では 10 秒のそれに比べて LFC の負担が増大し, 予測精度の影響が出ているといえよう。

図 15 は予測時間を 10 秒とし, 積分ゲインを 0.1 とした場合であるが, 周波数偏差, 連系線潮流偏差は積分ゲイン 0.5 および 1.2 に比べて大きくなっている。しかしながら, LFC 発電所と EDC 発電所の出力変化は増加率制約に掛かることなく滑らかに需要変動に追従している。積分ゲインが小さいときは, 周波数偏差と連系線潮流偏差のふれが大きくなり, 運用特性の低下につながる。

以上の応答特性からわかるように, EDC と LFC を協調させた提案する AGC により効果的な需給制御が行えることが示された。また, 電力系統に生ずる需要変動に対して, 各地域の周波数偏差ならびに連系線潮流偏差をどの程度に収めるかによって所要の積分ゲインの大きさが決まる。積分ゲインを大きくできるかどうかは, EDC 発電所ならびに LFC 発電所の可能応答能力に依存するので, その応答能力に注意をはらわなければならない。従来の TBC では積分ゲインを大きくするとシステムが振動的になり不安定になりやすいが, 提案する AGC では積分ゲインが 1.2 程度でも問題はなかった。また需要変動の予測時間を短くし, 予測の精度を上げるとむだな発電所出力の変動が避けられ, 効果的な需給制御が行えることが示された。

7. ま と め

本研究では電力系統に生ずる需要変動に対して, LFC と EDC の二つを協調させた分散形の自動発電制御方式(AGC)を積分形最適制御理論の立場から構築した。提案する AGC を用いることによって, 各地域

の周波数ならびに連系線潮流偏差を効果的に抑制できることが数値シミュレーションにより示された。

また、得られた応答特性から、各地域の周波数偏差ならびに連系線潮流偏差を所望する規定値に収めるためにはそれに応じた積分ゲインの大きさが必要で、すなわち、LFC 発電所ならびに EDC 発電所の応答能力の向上がなされねばならないことが示された。

更に、需要変動の予測精度を向上させれば、EDC および LFC 発電所出力のむだな動作が避けられることがわかった。

本論文では、時間連続形の AGC について考えてきたが、最近では制御系の構築はデジタル形式に移行しているので、実際には離散形で実行されなければならない。そのための変換は、サンプリング時間の問題はあるがデジタル再設計法の適用により容易に離散形に変換できる⁽²⁰⁾。

今後は、この AGC をより効果的に行うために不可欠な、需要変動の予測法の改善ならびに周波数調整に重要な役割を果たしている水力発電所を含めた場合の需給運用について研究を進めたいと考えている。

(平成 4 年 11 月 4 日受付, 同 5 年 6 月 3 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), No. 40 (昭 51-2)
- (2) 電力系統の需給制御技術調査専門委員会:「電力系統の需給制御技術」, 電気学会技報(II), No. 302 (平元)
- (3) T. M. Athay: "Generation Scheduling and Control", *Proc. IEEE*, **75**, No. 12, 1952 (1987)
- (4) L. S. Vanslyck: "A Comprehensive shakedown of an automatic generation control process", *IEEE Trans. Power Syst.*, **4**, No. 2, 771 (1989)
- (5) L. S. Vanslyck: "Implications of frequency control bias settings on interconnected system operation and inadvertent energy accounting", *ibid.*, **4**, No. 2, 712 (1989)
- (6) J. L. Carpentier: "Basic theoretical properties for an advanced automatic generation control", IFAC 9th World Congress, Vol. 1, No. 01.1/F 1, p. 159 (1984)
- (7) P. Kambale, H. Mukai, J. Spare & J. Zaborsky: "A reevaluation of the normal operating state control (AGC) of the power system using computer control and system theory. Part III. Tracking the dispatch targets with unit control", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-102**, No. 6, 1903 (1983)
- (8) 根岸, 他:「最適制御理論による LFC と ELD の協調」, 電気学会電力技術研資, PE-88-141 (昭 63)
- (9) L. K. Kirchmayer: *Economic Operation of Power System* (1958) John Wiley & Sons
- (10) C. E. Fosha & O. I. Elgerd: "The megawatt-frequency control problem: a new approach via optimal control theory", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-89**, No. 4, 563 (1970)
- (11) 古田, 他:「メカニカルシステム制御 (昭 62) オーム社
- (12) 計測自動制御学会編: 自動制御ハンドブック基礎編 (昭 58) オーム社
- (13) 白井, 他:「集中形をベースとした分散形 LFC の確立」, 昭 62 電気学会全大, No. 949, 1247
- (14) K. Okada, R. Yokoyama, H. Sasaki & G. Shirai: "Decentralized Demand Prediction for Multi-area Load Frequency Control", IEEE/PES 1990 Winter Meeting, Atlanta, U. S. A. (1990)
- (15) 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, **111**, 570 (平 3-5)
- (16) 白井:「負荷外乱の推定を考慮した離散形 V 関数による負荷周波数制御」, 同上 B, **105**, 843 (昭 60-10)
- (17) 浜場, 他:「平常時運用データを用いた系統定数推定手法」, 同上 B, **111**, 635 (平 3-6)
- (18) 関根: 電力系統過渡解析論 (昭 59) オーム社
- (19) IEEE Working Group: "Current Operating Problems Associated with Automatic Generation Control", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-98**, No. 1 (1979)
- (20) 近藤・原:「デジタル再設計—連続時間制御則からデジタル制御則へ—」, システムと制御, **31**, No. 5 (昭 62)
- (21) 白井, 他:「EDC と LFC の協調による需給制御(第二報)」, 平 3 電気学会全大, No. 1054

白井 五郎 (正員)

昭和 45 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年法政大学工学部電気工学科研究助手, 現在, 同教授。電力系統の安定化制御, 需給運用制御, 電圧安定性などの研究に従事。

沓掛 政志 (准員)

平成 3 年 3 月法政大学工学部電気工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科電気工学専攻入学, 現在に至る。電力システムの運用制御に関する研究に従事。

竹内 茂 (正員)

昭和 34 年 3 月中央大学工学部電気工学科卒業。同年法政大学工学部電気工学科実験助手, 現在, 同講師。電気工学実験担当。電力系統の安定度向上対策, 電圧不安定現象などの研究に従事。