H_{∞} 制御に基づく地域分割型負荷周波数制御

学生員 石井 利幸 (法政大)

正員 白井 五郎 (法政大)

正員 藤田 吾郎 (芝浦工業大)

Decentralized Load Frequency Control Based on H_{∞} Control

Toshiyuki Ishii, Student Member, Goro Shirai, Member (Hosei University)

Goro Fujita, Member (Shibaura Institute of Technology)

This paper presents a decentralized load frequency control (LFC) based on H_{∞} optimal control theory with observer. A few LFC schemes have been proposed based on the optimal control theory, but they have not considered the change of system parameters in the operation and the characteristics of load disturbances in a target system. In this paper, H_{∞} robust control is introduced to address such problems. From the practical merit, the proposed control scheme is a decentralized LFC. Employing observer theory, the proposed method requires only frequency and tie-line power deviation in each area. The numerical simulations are shown to demonstrate the effectiveness of the proposed method. H_{∞} control was proven to show greater effectiveness of damping disturbance over the conventional optimal control by the design of control systems aimed at restricting the H_{∞} norm of its transfer function. Particularly, when a decentralized LFC is applied, by reducing the system size H_{∞} norm is easier to dampen, thus H_{∞} control is more effective in the decentralized control. Future research topics include the design of H_{∞} control system with a weight on frequency response.

キーワード：自動発電制御，負荷周波数制御， H_{∞} 制御，地域制御誤差

1. はじめに

電力系統における自動発電制御 (AGC: Automatic Generation Control)の目的は、時々刻々と変動する負荷需要に対して、適切な供給電力を供給することである。長周期の需給変動に対しては経済負荷配分制御 (EDC: Economical load Dispatch Control) があり、経済的な効果を考慮した需給制御が実施されている。一方、短周期の需給変動に対しては負荷周波数制御(LFC: Load Frequency Control)がある。多地域が連系された今日の電力系統においては、自地域の周波数のみならず、連系線の潮流変動を基準値に保つことが行われている。本論文で対象とするのは後者の負荷周波数制御である。

自動発電制御の歴史は 60 年以上ともなり、適用系統の規模も大きくなり、これまで制御技術が進歩してきたが、そこで出てきた制御コンセプト、目的、シミュレーションモデルは、今日の電力系統には十分でないといわれている^[1]。

自動発電制御は、我が国では各地域の電力会社における固有の課題であり、一般に発表され議論が進むという機会に恵まれていない。しかし、規制緩和の進んだ欧米では、

積極的に問題提示と研究が行われることが少なくない。

連系線バイアス制御 (TBC: Tie-line Bias Control)は負荷周波数制御を代表的する需給制御方式である。これは各地域が連系線で接続されているとき、自地域では周波数変動および連系線潮流変動を測定し、これらから地域制御誤差 (ACE: Area Control Error)を算出する。原則として、いかにしてこの ACE を計算するかが、今日の研究の中心である。この ACE 算出について再構築を行った研究^[2]がある一方で、ニューラルネットワークを用いた制御方式の提案^{[3][4]}も行われている。後者ではバイアス値設定の省略について研究している^[4]。同じくニューラルネットワークを適用した例でも、対象とする外乱について言及し、圧延機や溶鉱炉など、短時間に発生する需要変動に焦点をあてた研究^{[5][6]}もある。また最近では解析ツールの発達に伴い、周波数領域における解析例^[7]も出てきている。周波数領域の解析では、システムの有するロバスト性について議論をすすめることが可能となる。

筆者らのグループでは、最適レギュレータ等の現代制御理論に基づく、自動発電制御の研究を進めてきた^{[8]-[14]}。最適レギュレータは、対象システムの状態変数が多くなる場

合にも、線形性が保たれる限り、常に最適解を与えるという特徴がある。これを自動発電制御に適用した場合^[9]、制御効果は確実に得られるものの、以下の2つの問題点がある。

1つは全地域の全状態量が観測可能であることを前提としていることである。実電力系統においては、一般に他地域の情報を時間遅れなしに同時に収集することは、不可能である。将来的にはGPSを利用することも考えられるが、それでもデータ計測から伝送処理を終えるまで1s程度の時間遅れを伴うため、現実的ではない。しかし、この問題については、すでに地域分割型のゲイン計算を導入することで解決を行うことを試みている。もう1つは、自地域内においても、そもそも観測可能な状態量が限定されることである。これについてはオブザーバを導入することで、限られた観測量から、観測不可能の状態量を推定し、フィードバックするように改良を行った^{[10][11]}。

一方、最近では、 H_∞ 制御に代表される、ロバスト制御に関する研究が、さまざまな制御問題に適用検討されてきている^{[12][13]}。 H_∞ 制御の特徴は、周波数領域上の応答特性を積極的に考慮することで、システムの安定性向上をはかることである。この H_∞ 制御にオブザーバを組み合わせることで準最適かつ実用的な制御方式の確立が可能となる。

そこで、本論文では H_∞ 制御理論の概念に基づく負荷周波数制御の確立を試みる。そして、提案手法を火力周波数調整発電所から構成される3地域電力系統モデルとさらに水力・火力というそれぞれ特性の異なる周波数調整発電所から構成される6地域電力系統モデルの大小2つの電力系統モデルに適用し、数値シミュレーションからその有用性について検討する。

2. 提案するLFCの設計

〈2・1〉 サーボ系の設計^[14] 実際に電力系統に入ってくる持続的な外乱に対してシステムを定常偏差なく目標値に追従させるためには、積分動作を制御系に含めた最適サーボ系の設計が必要である。

対象とする負荷外乱の大きさは通常、系統容量の1~2%以下といわれており、この程度の負荷変動については電力系統の状態方程式は、次の微分方程式で記述される。

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

ここで、 x は n 次元状態ベクトル、 u は m 次元操作ベクトル、 ΔPd は r 次元外乱ベクトルである。 A 、 B 、 Γ は $(n \times n)$ 、 $(n \times m)$ 、 $(n \times r)$ 次元係数行列である。また、(1)の状態量 x の観測方程式を

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

とおく。ここで、 C は $(m \times n)$ 次元観測行列である。

まず、最適サーボ系においては $v = \dot{u}$ を制御入力として

(1)、(2)を拡張する。

$$\dot{x}_e = A_e x_e + B_e v + \Gamma_e \Delta Pd \quad (3)$$

$$y = C_e x_e \quad (4)$$

$$\text{ただし } x_e = \begin{bmatrix} x^T & u^T \end{bmatrix}^T$$

$$A_e = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_e = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}$$

一方、需要変動発生後の x 、 u が一定値 x_s 、 u_s に収束するとし、また、 y の目標値を r とすると、この x_s 、 u_s は(1)、(2)の定常解

$$\begin{bmatrix} 0 \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ u_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \Delta Pd \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

より、次のように表される。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\Gamma \Delta Pd \\ r \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで定常値 x_s 、 u_s からの偏差値を $X = x_s - x$ 、 $U = u_s - u$ 、さらに目標値からの偏差値を $E = r - y$ とすると、(3)、(4)は

$$\dot{\alpha x}_e = \begin{bmatrix} X^T & U^T \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

として

$$\dot{\alpha x}_e = A_e \alpha x_e + B_e v \quad (8)$$

$$E = C_e \alpha x_e \quad (9)$$

と表される。ゆえに X 、 U を0にすることによって、 E が0に到達可能であるとわかる。

以上の定式化された制御システムに対してLQRを用いて、以下のように最適フィードバック制御を設計する。(8)に対して正定の重み行列 Q 、 R を用いた評価関数

$$J = \int_0^\infty (E^T Q E + v^T R v) dt \quad (10)$$

を最小化する最適フィードバック制御問題を解くと

$$v = -F \alpha x_e \quad (11)$$

となる。そしてこの時の最適解は次式で与えられる。

$$F = R^{-1} B_e^T P \quad (12)$$

ここで $(n+m \times n+m)$ 行列 P は次のRiccati方程式

図1 サーボ系最適制御方式

Fig.1. Block diagram of optimal servo control.

$$A_e^T P + P A_e + Q - P B_e R^{-1} B_e^T P = 0 \quad \cdots \cdots (13)$$

の正定対称解である。

ここで(11)は、 X と U のフィードバックで表されているため、このままでは実現できない。そこで状態量 x と偏差 E のフィードバックの形式に変換する。(11)は(1), (2)および(6)より次のように変換される。

$$v = -F \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\dot{x} \\ E \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (14)$$

ここで、

$$-F \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1} = [K_1 \quad K_2] \quad \cdots \cdots (15)$$

ただし $K_1 : (m \times n)$ 比例ゲイン

$K_2 : (m \times m)$ 積分ゲイン

とおき、(14)を時刻0から t まで積分することにより

$$u = -K_1 x + K_2 \int_0^t E dt + K_1 x_0 \quad \cdots \cdots (16)$$

なる制御則が得られ、初期状態 $x_0 = 0$ のとき図1に示される制御系は最適サーボ系となる。なお、設計の段階における(13)式の重み行列 Q, R はそれぞれ $C^T C, 1.0$ (対角要素)とする。そのときの積分ゲイン K_2 は1.0である。

〈2・2〉 H_∞ 制御理論への拡張^{[17][18]} H_∞ 制御では古典制御と同様に対象システムを伝達関数で表すが、その伝達関数のノルムに着目することにより、種々の設計仕様を満たすことを目的としている。 H_∞ 制御において重要な概念であるのが、 H_∞ ノルムであり、これは伝達関数の大きさを与える一つの手段である。その評価には周波数応答の絶対最大値を使う。 H_∞ ノルムは

$$\|G(s)\|_\infty = \max_{0 \leq \omega < \infty} |G(j\omega)| \quad \cdots \cdots (17)$$

と定義される。

ここで定数 γ_∞ を任意の周波数 ω に対して次式のように定義する。

$$\gamma_\infty = \inf_u \sup_w \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} \quad \cdots \cdots (18)$$

(18)は入出力のエネルギー比、すなわち、外乱入力信号のエネルギー $\|w\|_2$ に対する制御出力信号のエネルギー $\|z\|_2$ の比の最大値(最悪値)を表しており、 H_∞ ノルムが小さいほど入力が出力に及ぼす影響が少ない。閉ループ系の適当な入力点から出力点までの伝達関数 G の H_∞ ノルム $\|G(s)\|_\infty$ を評価基準とすると次の有界条件

$$\gamma_\infty \leq \|G(s)\|_\infty \leq \gamma \quad \cdots \cdots (19)$$

を満足するゲインは以下の Riccati 方程式から求められる。

$$A_e^T P + P A_e + Q - P B_e R^{-1} B_e^T P + \frac{1}{\gamma^2} P \Gamma_e \Gamma_e^T P = 0 \quad \cdots (20)$$

このとき、重み行列 Q, R はそれぞれ1.0(対角要素)とする。

このように H_∞ 制御では最適レギュレータを拡張した形で定式化し解を求めることができる。従来の最適レギュレータはシステムに対する外乱の影響を考慮していないことから $\gamma \rightarrow \infty$ の場合に相当する。しかし、 H_∞ 制御の場合には外乱を考慮することから、 $\gamma \rightarrow \gamma_\infty$ の場合に相当する。これは、伝達関数の H_∞ ノルムを最小化することを意味している。

〈2・3〉 最小次元オブザーバの導入 状態量 x のうち l 個の状態量が直接観測できたとき、観測不可能な $n-l$ 個の状態量を観測量 $y = Cx$ から最小次元オブザーバを用いて推定できる。そこで、このようなオブザーバを含んだ最適サーボ制御系を設計する。まず、(1), (2)で表されるシステムにおいて、オブザーバを次のように構成する。

$$\dot{z}_1 = \hat{A} z_1 + \hat{K} y + \hat{B} u \quad \cdots \cdots (21)$$

$$\hat{x} = D z_1 + H y \quad \cdots \cdots (22)$$

このとき $\hat{A}, \hat{K}, \hat{B}, D, H$ の各係数行列の間には

$$\hat{A} M = M A - \hat{K} C, \quad D M + H C = I, \quad \hat{B} = M B$$

なる関係を満たす、ある行列 M が存在する。

なお、ゴビナスの設計法^[16]に基づき

$$S = \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}$$

ただし、 T は S が正則行列となるような $(n-l \times l)$ 次元の任意の行列

$$S A S^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{matrix} l \\ n-l \end{matrix}, \quad S B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \begin{matrix} l \\ n-l \end{matrix}$$

とし、各係数行列を

$$\hat{A} = A_{22} - L A_{12}, \quad \hat{K} = \hat{A} L + A_{21} - L A_{11}, \quad \hat{B} = B_2 - L B_1,$$

$$D = S^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n-l} \end{bmatrix}, \quad H = S^{-1} \begin{bmatrix} I_l \\ L \end{bmatrix}$$

とすれば最小次元オブザーバが得られる。

図2 オブザーバを含めたサーボ系

Fig.2. Block diagram of servo system with observer.

このとき制御入力 u は

$$u = -K_1 \hat{x} + K_2 z_2 \quad (23)$$

$$\dot{z}_2 = r - y_d \quad (24)$$

で表され、観測方程式は次のようになる。

$$y_d = C_d x \quad (25)$$

本研究では、出力 y_d は各地域の ACE となるように観測係数行列 C_d を決定する。すると、3 地域連系系統を例にとった場合、各地域毎に ACE を割り出すことにより、出力 y_d は次のようになる。

$$y_d = [ACE_1 \quad ACE_2 \quad ACE_3]^T \quad (26)$$

一般に負荷周波数制御の目的は、周波数偏差並びに連系線潮流偏差を 0 に収めることである。従来、TBC 制御方式では自地域内で生じた負荷外乱は、自地域内の発電所で吸収することを前提として制御機構を構成してきた。このときに ACE を導入し、その ACE に比例、積分制御を施し、負荷周波数制御の目的を果たしている。通常、ACE は以下のように自地域の周波数偏差 ΔF_i と連系線潮流偏差 $\Delta Ptie_i$ で表わす。

$$ACE_1 = \beta_1 \Delta F_1 + a_{12} \Delta Ptie_{12} \quad (27)$$

$$ACE_2 = \beta_2 \Delta F_2 + \Delta Ptie_{12} + \Delta Ptie_{23} \quad (28)$$

$$ACE_3 = \beta_3 \Delta F_3 + a_{23} \Delta Ptie_{23} \quad (29)$$

ただし、 β_i は地域 i における周波数バイアス値、 a_{ij} は地域 i と地域 j の系統容量比である。

図 2 の制御系においてこの ACE に相当する出力 y_d を 0 にするような制御入力をシステムに加える。このとき合成系は

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_1 HC & BK_2 & -BK_1 D \\ -C_d & 0 & 0 \\ \hat{K}C - \hat{B}K_1 HC & \hat{B}K_2 & \hat{A} - \hat{B}K_1 D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z_2 \\ z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \Delta Pd \\ rI \\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

となる。

3. 提案する分散型 LFC

〈3・1〉 集中型制御と分散型制御 現在の電力系統は、連系系統として協調を保ちつつ運用されているが、実際にはそれぞれ異なる特徴をもった個々の電力会社より成り立っており、それぞれ独自の運用形態をとっている。電力

図 3 集中型制御系と分散型制御系の比較

Fig.3. Comparison of central and distributed systems.

系統の自動制御は、各電力会社ごとに自社内のシステムに対して発達し、その後系統が全国的に連系されてきた。そのため電力システムを全体から見れば集中制御ではなく、各電力会社をサブシステムとした分散型制御といえる。図 3 は電力系統における集中型制御系と分散型制御系の違いを概念的に示したものである。

〈3・2〉 地域分割による方法^[20] ここで、3 地域連系系統を例にとり、地域分割型 LFC について考える。図 4 のように分割された地域 i における状態方程式、観測方程式が次式で表されているとする。

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + \Gamma_i \Delta Pd_i \quad (31)$$

$$y_i = C_i x_i \quad (i=1,2,3) \quad (32)$$

ここで、 x_i , u_i , ΔPd_i , y_i はそれぞれ地域 i における状態ベクトル、制御ベクトル、外乱ベクトル、観測ベクトルであり、 A_i , B_i , C_i , Γ_i はそれぞれ適当な次元の係数行列である。このように表現された各サブシステムを、独立した複数の地域として取り扱い、各地域ごとに最適ゲインとオブザーバの各係数行列を決定する。

しかし、各地域で入手できる他地域情報が連系線潮流に関する情報のみの場合、自地域の可制御性を損なう可能性がある。

図 4 対象システムの分割

Fig.4. Decomposition of the system.

図 5 提案する地域分割型制御

Fig.5. Proposed area-based control.

具体的には、図4の中で地域2に関しては他の2地域と連系していることから、両側の連系線潮流が互いに従属の関係となり、このサブシステム行列に零の固有値が発生して安定化不可能となる。このようにランク落ちによって可制御性を失った分割地域は、隣接地域の一部を含めることによって従属ベクトルを独立ベクトルに修正することで、可制御性を回復することができる。このとき可制御性を回復させる状態変数として、入手が比較的容易であるといわれている隣接地域の周波数偏差の情報を用いる。このため地域2については、(31)、(32)は次式のような拡張型で表す必要がある。

$$\dot{\bar{x}}_i = \bar{A}_i \bar{x}_i + \bar{B}_i \bar{u}_i + \bar{\Gamma} \Delta P d_i \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$\bar{y}_i = \bar{C}_i \bar{x}_i \quad (i=2) \quad \dots\dots\dots (34)$$

ただし、 $\bar{x}_i = \begin{bmatrix} x_i^T & x_{ai}^T \end{bmatrix}^T$

$$\bar{B}_i = \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\Gamma} \Delta P d_i = \begin{bmatrix} \Gamma \Delta P d_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

である。 x_{ai} は地域*i*の隣接地域に関する状態ベクトルで、可制御性回復のために必要な状態量であり、その要素は隣接地域の周波数情報となる。

ちなみに、このような地域分割型でH_∞制御理論を適用した場合、各地域の(20)における γ_c の値は地域順に5.345, 9.713, 7.255となり、そのときのフィードバック積分ゲイン K_2 はそれぞれ20.510, 42.863, 1.986となった。

4. 電力システムモデルによるシミュレーション

〈4・1〉電力システムモデル 提案するLFCを評価するにあたり、図6に示す小規模電力システムモデルと図7に示す大規模電力システムモデルの2種類を用いる。図8は各地域のモデル図であり、再熱型火力発電所と水力発電所を含んだものである。小規模電力システムモデルについては、各地域が火力発電所からなる3地域串型連系システムモデルを構成し、系統容量比を図6のように5:10:2とする。図8において火力機の負荷配分係数である α_i は1.0(100%)となる。このときの各定数は表1に示される。

一方、大規模電力システムモデルにおいては、各地域が火力、水力発電所からなる6地域連系システムモデルを構成する。これは、主に西日本の電力システムを参考としたもので、図7中の各地域における数値はそれぞれの地域における発電電力を示している。この発電電力から各地域間の系統容量比を決定し、そのときの各定数を表2に示す。また、H_∞ノルム、フィードバック積分ゲイン K_2 を表3に示す。

〈4・2〉実負荷変動 電力システムに生じる負荷変動は時間とともに変化する。そこで、次のようなスペクトルパターンを有する負荷変動が地域2に発生したと想定し、そ

のときの応答特性を検討する。

$$S(\omega) = A/\omega^m \quad \dots\dots\dots (35)$$

ただし、 A :比例定数、 ω :周波数

電力システムに生じる負荷変動のパワースペクトルは、その実測データの解析から経験的に(34)のように表すことができ、 m はおおよそ2の値をとるとされている。このスペクトルを有する負荷変動の数値シミュレーションについては文献[19]を参考とした。

図6 3地域串型連系システム

Fig.6. 3-area longitudinal interconnected power system

図7 6地域連系システム

Fig.7. 6-area power system

表1 3地域連系システム定数表

Table.1. 3-area power system parameters

(a) 各地域 (a) each area					
定数名	記号	単位	地域1	地域2	地域3
慣性定数	M_i	puMW-s/Hz	0.200	0.167	0.150
制動定数	D_i	puMW/Hz	0.006	0.0083	0.008
火力タービン時定数	T_{ti}	s	0.25	0.30	0.25
火力タービン再熱時定数	Tr_i	s	10.0	9.0	8.0
火力タービン再熱係数	Kr_i		0.5	0.5	0.5
火力ガバナ開度時定数	Tg_{ii}	s	0.10	0.08	0.10
火力ガバナ速度調定率	R_{gi}	Hz/puMW	2.22	2.50	2.50
火力機への負荷配分	α_i		1.0	1.0	1.0
周波数バイアス値	β_i	puMW/Hz	0.456	0.4083	0.458
(b) 地域間 (b) interarea					
定数名	記号	単位	地域1-2	地域2-3	
地域 <i>ij</i> 間の同期化係数	T_{ij}	puMW/Hz-s	0.6	0.6	
地域 <i>ij</i> 間の系統容量比	a_{ij}		2.0	5.0	

表 2 6 地域連系システム定数表
Table.2. 6-area power system parameters

(a) 各地域
(a) each area

定数名	記号	単位	地域1	地域2	地域3	地域4	地域5	地域6
慣性定数	M_i	puMW-s/Hz	0.200	0.167	0.150	0.200	0.167	0.150
制動定数	D_i	puMW/Hz	0.006	0.0083	0.008	0.006	0.0083	0.008
火力タービン時定数	T_{Ti}	s	0.25	0.30	0.25	0.25	0.30	0.25
火力タービン再熱時定数	Tr_i	s	10.0	9.0	8.0	10.0	9.0	8.0
火力タービン再熱係数	Kr_i		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
水カタービン開度時定数	T_{wi}	s	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
火力ガバナ開度時定数	T_{Gi1}	s	0.10	0.08	0.10	0.10	0.08	0.10
水力ガバナ開度時定数	T_{Gi2}	s	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
水力ガバナ開度時定数	T_{Gi3}	s	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
水力ダッシュポット時定数	Th_i	s	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
火力ガバナ速度調定率	R_{i1}	Hz/puMW	2.22	2.50	2.50	2.22	2.50	2.50
水力ガバナ速度調定率	R_{i2}	Hz/puMW	2.22	2.50	2.22	2.22	2.50	2.22
火力機への負荷配分	α_i		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
周波数バイアス値	β_i	puMW/Hz	0.456	0.4083	0.458	0.456	0.4083	0.458

(b) 地域間
(b) interarea

定数名	記号	単位	地域1-2	地域2-3	地域3-4	地域4-5	地域4-6
地域 i 間の同期化係数	T_{ij}	puMW/Hz-s	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
地域 i 間の系統容量比	a_{ij}		36371/5508	36371/27508	36371/10631	10631/6314	10631/16923

表 3 6 地域連系システムにおける H_∞ ノルムと積分ゲイン

Table.3. H_∞ norms and integral gains of 6-area power system

定数名	記号	地域1	地域2	地域3	地域4	地域5	地域6
H_∞ ノルム	γ_∞	6.901	9.535	5.064	6.594	5.199	4.939
積分ゲイン	K_2	1.625	43.982	56.371	7.352	12.900	31.088

図 8 第 i 地域のモデル系統図

Fig.8. Block diagram of model system for area i -th.

5. 応答特性

〈5・1〉 3 地域電力系統における応答特性 提案する LFC の有用性について検討するため、図 9 に示すような $1/\omega^2$ 型パワースペクトルパターンを有する中心周期 10 分の負荷変動が地域 2 に発生したときの TBC, 最適サーボ系, 提案手法, それぞれの周波数制御方式の数値シミュレーションから得られた各地域の周波数偏差 ΔF_i のスペクトル密度

を示す。図 11 は(13)から得られるゲインによって設計された最適サーボ系による応答特性であるが、図 10 の TBC による応答特性に比べると高周波数域ではスペクトル密度をよく抑えているものの、低周波数域においては TBC の方が若干優れているところがある。一方、(20)によって設計される提案手法の応答特性を図 12 に示す。TBC の応答特性と比較すると全域にわたってスペクトル密度をよく抑えており、周波数変動を小さくするような応答特性が得られた。

ところで、最適サーボ系と提案手法におけるフィードバックゲインは、システムをモデル化してから求められるものであるが、そのモデル化の過程で、正確なデータを得ることは難しく、必ずしもシステム全体としての安定性が保証されるというわけでない。システムに誤差が含まれると考えられる部分は、非常に巨大なシステムである負荷モデルにあると考えられる。そこで、図 8 中の負荷のパラメータである、慣性定数 M_i と制動定数 D_i にそれぞれ $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ のパラメータ誤差を含めたときの数値シミュレーションを行った。ただし、本論文においては最もシビアな値である $+15\%$ のパラメータ誤差を含むときの最適サーボ系と提案手法の応答特性をそれぞれ図 13 と図 14 に示した。

最適サーボ系と提案手法はそれぞれ、パラメータ誤差が含まれる場合でもシステムを安定に保たれることがわかる。しかし、最適サーボ系の応答特性は、パラメータに誤差が含まれないときと比較すると負荷変動の吸収が悪くなり、低周波数帯域では TBC の方が良好な応答特性となっている。提案手法においてはほとんどパラメータ誤差による影響が見られず、最適サーボ系に比べてロバスト性を有していることがわかる。また、TBC と比較しても良好な応答特性が得られた。

図 9 電力システムの負荷変動

Fig.9. Load fluctuations in power system

図 10 TBC による応答

Fig.10. Response with TBC

図 11 最適サーボ系による応答特性
(パラメータ誤差含まず)

Fig.11. Response with Optimal servo control
(without uncertainty)

図 12 提案手法による応答特性
(パラメータ誤差含まず)

Fig.12. Response with H_∞ control
(without uncertainty)

図 13 最適サーボ系による応答特性
(パラメータ誤差含む)

Fig.13. Response with Optimal servo control
(with uncertainty)

図 14 提案手法による応答特性 (パラメータ誤差含む)
Fig. 14. Response with H_∞ control (with uncertainty)

図 15 TBC による応答特性
Fig. 15. Response with TBC

図 16 最適サーボ系による応答特性 (パラメータ誤差含まず)
Fig. 16. Response with Optimal servo control (without uncertainty)

図 17 提案手法による応答特性 (パラメータ誤差含まず)
Fig. 17. Response with H_∞ control (without uncertainty)

図 18 最適サーボ系による応答特性 (パラメータ誤差含む)
Fig. 18. Response with Optimal servo control (with uncertainty)

図 19 提案手法による応答特性 (パラメータ誤差含む)
Fig. 19. Response with H_∞ control (with uncertainty)

＜5・2＞ 6 地域電力系統における応答特性 前節では、火力発電所からなる 3 地域電力系統における LFC の検討を行った。ここでは、火力発電所と水力発電所からなる 6 地域という大規模電力系統における提案手法の応答特性について、前節と同様に TBC、最適サーボ系と比較し、さらに、小規模電力系統と大規模電力系統の応答特性の比較も行いながらその有用性について検討する。

まず、最適サーボ系の応答特性を図 16 に示す。図 15 の TBC の応答特性に比べ良好な結果が得られた。3 地域電力系統に適用したときと同様に、高周波数帯域ではスペクトル密度を抑えているが、低周波数域ではうまく抑えられていない。一方、図 17 は提案手法による応答特性を示したものであるが、TBC と最適サーボ系の応答特性に比べ全体的にスペクトル密度を抑え込むことができている。しかし、0.1Hz 付近の周波数帯域における地域 6 のスペクトル密度は最適サーボ系の方が良好な応答特性が得られた。

ここで、前節の 3 地域電力系統における数値シミュレーションと同様に負荷側に誤差を含めたときの最適サーボ系と提案手法による数値シミュレーションを行った。そのときの最適サーボ系、提案手法による応答特性をそれぞれ図 18、図 19 に示す。最適サーボ系の応答特性は、パラメータ誤差を含まないときと比べ、全体的にスペクトル密度が

大きくなっている。それに対し、提案手法の応答特性は負荷側に誤差が含まれていてもさほどスペクトル密度が大きくなることはない。しかし、0.1Hz 付近の周波数帯域における地域 6 の応答特性に関しては、最適サーボ系の方が良好な応答特性となっている。また、パラメータに誤差が含まれることにより、図 17 のパラメータ誤差を含まないときに比べ、スペクトル密度が突出して大きくなる部分がある。パラメータに誤差が含まれていても、TBC、最適サーボ系に比べ、良好な応答特性が得られたものの、提案手法を 3 地域電力系統に適用したとき比較すると、パラメータ誤差の影響をうまく吸収できておらず、ロバスト性の低下が確認できる。

なお、この比較では水力系による影響も考えられる。しかし、水力発電所を含めない 6 地域の応答特性との比較も行ったが、同様に応答特性の低下が認められた。よって、これは地域の拡大に伴い、状態量が増加したことによる影響と考えられる。

6. まとめ

本論文では、入手可能な状態量に制約を受けるという前提のもと、オブザーバの導入をふまえた上で H_∞理論を適用し、各地域毎で制御を実施する地域分割型負荷周波数制御方式を構築した。さらに、この提案手法を 3 地域電力系統と 6 地域電力系統の 2 種類のモデルに適用し、その応答特性から有用性について検討した。

システムにパラメータ誤差を含まないときの最適サーボ系、提案手法の応答特性は従来型の負荷周波数制御方式である TBC に比べ、良好な応答特性が示された。特に提案手法については、効果的に負荷変動を吸収し、外乱抑圧効果が非常に高いものであるということがわかった。

また、大規模な電力系統においてはパラメータの誤差を含めて検討することが現実的であることから、負荷側にパラメータ誤差を含めた数値シミュレーションも行った。最適サーボ系に関しては、長周期の負荷外乱に対しては、むしろ TBC の方が良好な応答特性となった。これはパラメータに誤差が含まれないときにもこの傾向はみられた。一方、提案手法についてはシステムに誤差を含んでいても TBC よりも周波数偏差をよく抑制していることが判明した。しかしながら、提案手法を 3 地域電力系統に適用したときはパラメータ誤差による影響がなかったものの、6 地域電力系統に適用した場合、パラメータ誤差の影響により、応答特性が若干低下する傾向が示された。

(平成 11 年 01 月 27 日受付, 平成 11 年 12 月 27 日再受付)

文 献

- [1] N. Jaleeli, L. S. Vanslyck, D. N. Ewart, L. H. Fink, A. G. Hoffmann, 'Understanding Automatic Generation Control', IEEE Trans. Power System, Vol.7, No.3, Aug. 1992
- [2] R. P. Shulte, 'An Automatic Generation Control Modification for Present Demands on Interconnected Power Systems', IEEE Trans. Power System, Vol.11, No.3, Aug. 1996
- [3] G. A. Chown, R. C. Hartman, 'Design and Experience with a Fuzzy Logic Controller for Automatic Generation Control (AGC)', IEEE Trans. Power System, Vol.13, No.3, Aug. 1998
- [4] R. K. Green, 'Transformed Automatic Generation Control', IEEE Trans. Power System, Vol.11, No.4, Nov. 1996
- [5] L. D. Douglas, T. A. Green, R. A. Kramer, 'New Approach to the AGC Non-conforming Load Problem', IEEE Trans. Power System, Vol.9, No.2, May 1994
- [6] R. R. Shoultz, R. Kelm, D. Maratukulam, 'Improved System AGC Performance with ARC Furnace Steel Mill Loads', IEEE Trans. Power System, Vol.13, No.2, May 1998
- [7] A. M. Stankovic, G. Tadmor, Timoor A. Sakharuk, 'On Robust Analysis and Design for Load Frequency Regulation', IEEE Trans. Power System, Vol.13, No.2, May 1998
- [8] 竹内茂・組橋圭介・白井五郎, 「サーボ系最適制御による水・火力発電所よりなる電力系統の分散系 LFC」, 電気学会論文誌(B), Vol.112, No.9 (1992-9)
- [9] 白井五郎・沓掛政志・竹内茂, 「EDCとLFCの協調による分散形の自動発電制御」, 電気学会論文誌(B), Vol.113, No.12 (1993-12)
- [10] G. Fujita, S. Kawakami, G. Shirai, 'Decentralized Automatic Generation Control Considering Generation Rate Constraints Based on Observer Theory', International Conference of Power System Technology '94 (ICPST'94), pp.261-265, Oct. 1994
- [11] G. Shirai, S. Kawakami, G. Fujita, 'Automatic Generation Control Considering Generation Rate Constraints Based on Observer Theory', Stockholm Power Tech, IC06-06-0568, pp.211-216, June 1995
- [12] S. Niioka, R. Yokoyama, T. Ishii, G. Shirai, G. Fujita, 'Decentralized Load Frequency Control Based On H-inf Control with Observer Theory', The International Conference on Electrical Engineering '98 (ICEE'98), pp.214-217, July 1998
- [13] 石井利幸・竹内茂・白井五郎, 「オブザーバ理論を用いた H_∞制御による分散型LFC」, 平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, No.143 (1997-7)
- [14] 石井利幸・斎藤武・竹内茂・白井五郎, 「オブザーバ理論に基づくH_∞制御による地域分割型LFC」, 電力技術・電力系統技術合同研究会研究資料, PE(PSE)-97-71 (1997-10)
- [15] K. Ohtsuka, T. Taniguchi, T. Sato, S. Yokokawa, Y. Ueki, 'A H_∞ Optimal Theory Based Generator Control System', IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.7, No.1, March 1992
- [16] 古田勝久・川路茂保・美多勉・原辰次, 『メカニカルシステム制御』, オーム社, (1984)
- [17] 美多勉, 『H_∞制御』, 昭晃堂, (1994)
- [18] Alberto Isidori, Alessandro Astolfi, 'Disturbance Attenuation and H_∞-control via Measurement Feedback in Nonlinear System', IEEE Trans. Automatic Control, Vol.37, No.9, Sept. 1992

- [19] 八名和夫・白井五郎, 「電力系統における負荷変動の統計的モデル」, 電気学会論文誌(B), vol.111-B, No.5 (1991-5)
- [20] 佐々木博司・水野卓也・百合野真司, 「隣接地域の周波数情報の利用による地域分割型負荷周波数制御に関する一研究」, 電気学会論文誌(B), vol.107, No.7 (1987-7)

石井利幸 (学生員) 1974年11月13日生。
1997年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修士課程入学。電力システムの運用制御に関する研究に従事。

白井五郎 (正員) 1941年6月21日生。1970年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研究助手, 現在, 同教授。工学博士。電力システムの安定化制御, 需給運用制御, 電圧安定性などの研究に従事。IEEE, SICE 会員。

藤田吾郎 (正員) 1970年1月12日生。1992年法政大学工学部電気工学科卒業。1994年同大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1997年同博士課程修了。博士(工学)。1997年東京都立大学研究生, 1998年4月より芝浦工業大学工学部電気工学科講師。電力システムの制御に関する研究に従事。IEEE, SICE 会員。