

# スマートグリッドのための分散予測制御

滑川 徹\*

\*慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科

神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

\*Department of System Design Engineering, Keio University, 3-14-1  
Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa, Japan

\*E-mail: namerikawa@sd.keio.ac.jp

## 1. はじめに

エネルギー問題や地球温暖化が世界的な課題となっており、省エネルギー、コスト削減の観点から世界中で太陽光発電や風力発電バイオマス発電、コーチェネレーションなどの分散型電源が大量に電力系統に連系されようとしている。導入自体は地球環境保護の観点からは好ましいことであるが、分散型再生可能エネルギーを本格的に導入するためには、大規模・複雑化していくシステムをどのような形態で接続すべきかという電力ネットワークトポロジーの観点から、電力システムの安定性、最適性、経済性を再考する必要が生じる(図1参照)。具体的には分散電源を大量に導入することによって電力ネットワークの周波数や電圧が変動したり、それが酷くなると大規模停電に繋がる恐れがある<sup>1)</sup>。太陽光発電や風力発電や蓄電池群を大規模に導入した電力系統に対して、安全性を確保し、各発電機を協調させながら、最適な発電を行うアプローチとしてはさまざまな研究が行われているが<sup>2),3)</sup>、解析方法に関する結果が多く、制御理論の観点から分散電源を含む電力トポロジーを積極的に制御する方策についてはいまだ研究が進んでいない<sup>4)</sup>。

一方、1950年代の後半以降、不確実性の下の異なる情報を用いるゲーム理論やチーム理論などに基づく意思決定問題が研究された。1970年代に入り現代制御理論が成熟の時期を迎えたころ、分散制御との関わりが強くなり、空間的にサブシステムが結合した情報構造を有する大規模システムに関して研究が行われた<sup>5)~7)</sup>。

最近ではまた分散制御に関して第2の隆盛期とも言えるほどにさまざまな結果が報告されている<sup>8)~12)</sup>。これらの研究は純粋な制御理論の結果であるが、背景として本稿の主題であるエネルギー環境問題への応用・展開を強く意識している。

本稿で対象としているスマートグリッド(図1)は太陽光発電、風力発電などの直接制御不可能な再生可能エネルギーと、火力、水力、原子力などの多種多様な発電(供給)システムを有しており、消費(需要)システムとしては工場、ビル、一般家庭、電気自動車などが結合している大規模複雑系となっている。このような分散システムに関する研究は昨今の協調制御の流れ<sup>13),14)</sup>から分岐してきたものも少な

キーワード：スマートグリッド (smart grid)、分散制御 (distributed control)、予測制御 (predictive control)、情報結合構造 (information structure)、再生可能エネルギー (renewable energy)。  
JL 0001/12/5101-0001 ©2012 SICE

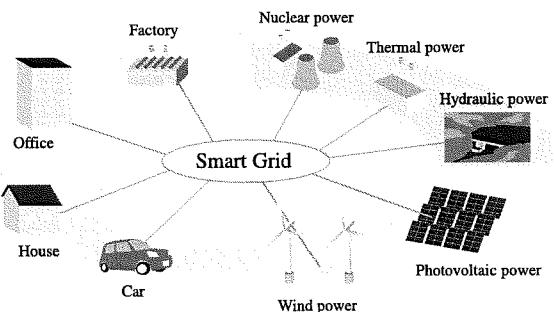


図1 スマートグリッド

くないが、本稿では特に情報構造を有するシステムの分散最適制御/予測制御問題に焦点を絞る<sup>10),11),15)~18)</sup>。

特にLund大学のRantzerらのグループの結果<sup>10),11)</sup>にフォーカスを当てると、線形時不变であるサブシステムの線形状態フィードバックゲインを分散勾配法の枠組みに沿って逐次updateすることでグローバルな線形システムのコスト関数を最小化する方法が提案されている。

また文献10)では線形確率システムに対して、情報結合構造が共分散拘束として表現され、その問題に対して有限時間区間、無限時間区間でのLQG制御法が提案されている<sup>12)</sup>。これらの手法は再生可能エネルギーを含むスマートグリッドに適用できる手法の1つであると思われる。

本稿の目的は分散電力システムを情報結合構造を有するシステムとして表現し、それに対して、反復勾配法を用いた分散制御を適用した結果と、線形確率システムに予測制御を適用した結果について報告し、分散制御／予測制御のアプローチについて、世界の研究の潮流と著者らの研究成果の一端を紹介することにある。

まず、一般的な分散システムの表現とそのシステムに対して反復勾配法を用いた分散制御の手法について解説する。続いて、情報結合構造を有するシステムに対する有限時間最適制御問題に対する予測制御手法について説明する。また2つのシミュレーション結果により、上記2種類の制御手法の有効性を検討する。

本稿では以下の表記法を用いる。 $\mathbb{Z}_+$ は非負の整数の集合である。 $\mathbb{R}^n$ はn次元の実数空間、 $\mathbb{R}^{m \times n}$ は $m \times n$ 次元の実数空間を表わす。 $\mathbf{E}$ は期待値作用素である。行列 $A$ に対して $\text{Tr } A$ は $A$ のトレースを表わす。行列 $Q$ に対し

て  $Q > 0$  ( $Q \geq 0$ ) は  $Q$  が(半)正定値行列であることを表わす。Tr はトレース作用素である。

## 2. 分散システムの表現

複数系統から構成される電力ネットワークを考える。ここですべての系統の数を  $N(\geq 2)$  とすると  $i$  番目 ( $i = 1, \dots, N$ ) の電力系統サブシステムの発展方程式は(1)式で表現される。

$$x_i(t+1) = \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t) + B_i u_i(t) + w_i(t) \quad (1)$$

ただし、時刻  $t \in \mathbb{Z}_+$ 、状態  $x_i(t) \in \mathbb{R}^{n_{xi}}$ 、入力  $u_i(t) \in \mathbb{R}^{n_{ui}}$ 、外乱  $w_i(t) \in \mathbb{R}^{n_{wi}}$  であり、 $w_i(t)$  は平均 0 の白色雑音とする。 $A_{ij}$ 、 $B_i$  は適当な大きさの実定数行列とする。これより系統  $i$  に与えられる制御入力  $u_i$ 、外乱  $w_i(t)$  は系統  $i$  にのみ与えられることがわかる。また電力系統の  $i$  と  $j$  が連系線で結合している場合は  $A_{ij}$  は電力系統  $i$  から  $j$  への影響を表わす。

集合  $\mathcal{N}_i$  は  $i$  番目のサブシステムの発展方程式に直接影響を与えるサブシステムの集合を表わす。対象とするネットワーク構造のグラフを  $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$  とすると、エッジ集合は  $(i, j) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow j \in \mathcal{N}_i \Leftrightarrow A_{ij} \neq 0$  と与えられる。

$N$  個の電力系統からなる電力ネットワークシステム全体の状態方程式は(2)式のように表わすことができる。

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \quad (2)$$

ただし、時刻  $t \in \mathbb{Z}_+$ 、状態  $x(t) = [x_1^T(t), \dots, x_N^T(t)]^T \in \mathbb{R}^{n_x}$ 、入力  $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ 、外乱  $w(t) \in \mathbb{R}^{n_w}$  であり、 $A$ 、 $B$  は適当な大きさの実定数行列とする。

たとえば図2のような構造の電力ネットワーク(ここで入力  $u$  と外乱  $w$  は考えない)のシステム全体の  $A$  行列は以下のように表わすことができる。

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 \\ 0 & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ 0 & 0 & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

さて、(2)式の全体システムに制御入力として以下のような状態フィードバックを施し、ある評価関数を最適化することを考える。

$$u(t) = -Lx(t) \quad (4)$$

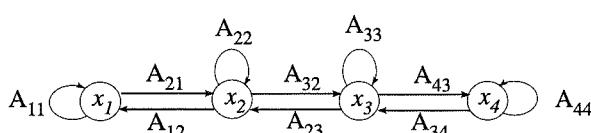


図2 分散型電力システムのトポロジー

これを集中管理ではなく、サブシステムで分散的に処理するためには、電力系統  $i$  の制御入力  $u_i(t)$  の計算には隣接するサブシステムの状態量の情報が必要となる。ここで  $L$  の構造を以下のように表現する。

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1N} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{N1} & L_{N2} & \dots & L_{NN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_{ij} = 0 \quad \text{if } (i, j) \notin \mathcal{E} \quad (6)$$

(6)式より、閉ループ系  $A - BL$  は全体システムの行列  $A$  と同様の情報結合構造を有する。

## 3. 反復勾配法による分散制御と系統周波数制御への応用

さて、制御目的として次式の非積分型の評価関数を定義し、その最小化を考える。

$$J(L) = E(|x|_Q^2 + |u|_R^2) \quad (7)$$

ここで  $|x|_Q^2 := x^T Q x$ 、 $|u|_R^2 := u^T R u$  であり、 $Q, R > 0$  とする。

この評価関数  $J$  を適切な  $L$  を選ぶことによって最小化することが制御目的である。特にここでは、 $L$  を逐次的に更新し、各時刻で最適化計算を行う。これは分散システムの情報結合構造の変化や予期せぬ故障や停電に対応するためである。また系統の規模によらず、系統の拡大、縮小にフレキシブルに対応することができると期待される。

$J$  が降下する方向に  $L$  を逐次的に更新させたいため、ここでは  $J$  の勾配  $\nabla_L J$  を用いて以下の更新則に従ってステップ  $k$  でのフィードバックゲイン  $L_k$  を調整する。

$$L_{k+1} = L_k - \gamma \nabla_L J \quad (8)$$

ここで  $\gamma > 0$  は十分に小さい実数であり、 $k \in \mathbb{Z}_+$  は更新ステップを表わす。

$L_k$  の更新アルゴリズムとして、たとえば以下の方法が挙げられる<sup>18), 19)</sup>。

**アルゴリズム 1** 時刻  $t_k$ において、状態フィードバックは  $u(t) = -L^{(k)}x(t)$  とし、電力系統  $i$  のフィードバック行列を更新する。

- 1) 隣接する系統の状態量を交換し  $t = t_k, \dots, t_k + n$  間の(1)式の状態を推定する。

$$x_i(t+1) = \sum_{j \in \mathcal{E}_i} (A - BL)_{ij} x_j(t) + w_i(t) \quad (9)$$

- 2) 隣接する系統の状態量を交換し、 $t = t_k, \dots, t_k + N$  の間の随伴状態  $\lambda_i(t)$  を逆方向に推定する。

$$\begin{aligned}\lambda_i(t-1) &= \sum_{j \in \mathcal{E}_i} (A - BL)_{ji}^T \lambda_j(t) \\ &\quad - \left( Q_i x_i(t) - \sum_{j \in \mathcal{E}_i} L_{ji}^T R_j u_j(t) \right) \quad (10)\end{aligned}$$

3) 隣接する電力系統  $j$  すべてを用いて  $\mathbf{E} u_i x_j^T$  と  $\mathbf{E} \lambda_i x_j^T$  を計算する。

$$\mathbf{E} u_i x_j^T = \frac{1}{N+1} \sum_{t=t_k}^{t_k+N} u_i(t) x_j(t)^T \quad (11)$$

$$\mathbf{E} \lambda_i x_j^T = \frac{1}{N+1} \sum_{t=t_k}^{t_k+N} \lambda_i(t) x_j(t)^T \quad (12)$$

4) サブシステム  $i, j$  の勾配を以下で与える<sup>18)</sup>.

$$G_{ij} = -2 [R_i \mathbf{E} u_i x_j^T + B_i^T \mathbf{E} \lambda_i x_j^T] \quad (13)$$

5) それぞれの隣接する系統  $j$  に対して、あるステップ  $\gamma$  とした時、 $L_{ij}^{(k+1)} = L_{ij}^{(k)} - \gamma G_{ij}$  とする。

6)  $t_{k+1} = t_k + 1$  とし、1) に戻る。

勾配  $\nabla_L J$  の計算はすべての状態の共分散とすべての状態と随伴状態との共分散が決定されている必要があるので、分散的に求めることができない。しかし、勾配の適切な予測情報があればフィードバック行列の分散制御則を決定できる。ここでは  $Q$  と  $R$  は対角行列と制限し、状態空間と各電力系統の入力の数を合わせる。この時、電力系統  $i$  が隣接する系統の情報を用いて  $\lambda_i$  を推定する<sup>19), 20)</sup>。

### 3.1 マイクログリッド系統モデル

再生可能エネルギーや蓄電池を導入した小規模電力系統が増加し、マイクログリッドのように小規模電力系統が複数連系されていくことが想定される。本稿では図3に示すように小規模電力系統が複数連系された4つのサブシステムからなる電力系統を考える。ここで電力系統の構成を同じと仮定し、ガスタービン発電機、風力発電機を用いて電力需要に対して電力供給を行う。電力系統の周波数制御としてTBC方式を用い、他系統との潮流を考慮し系統周波数の周波数変動を零に近づけるようにガスタービン発電機出力を制御する。エリアごとの発電機がすべて完全同期運転を行われていると仮定すれば、系統内のすべての発電機は統合した1台の等価的なモデルで表わせる<sup>21)</sup>。本稿では1つの系統容量を40MWとして、これを単位法における基準値とする。本稿では需要側に分散配置された大容量負荷は消費電力制御を行うため可制御とみなし、可制御負荷として電気温水器(ヒートポンプ等)および蓄電池(電気自動車等)を用いる。それぞれ系統容量の5%, 15%とする。なお詳細については文献19)を参照されたい。

### 3.2 シミュレーションによる検証

情報結合構造の影響を考慮するためすべてのコントローラがまったく同一の情報を得る場合、つまり集中制御(Centralized Control)、およびコントローラが隣接する系統の

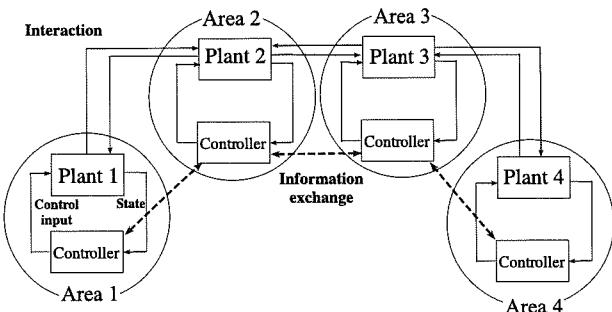


図3 電力トポロジーと分散制御構造

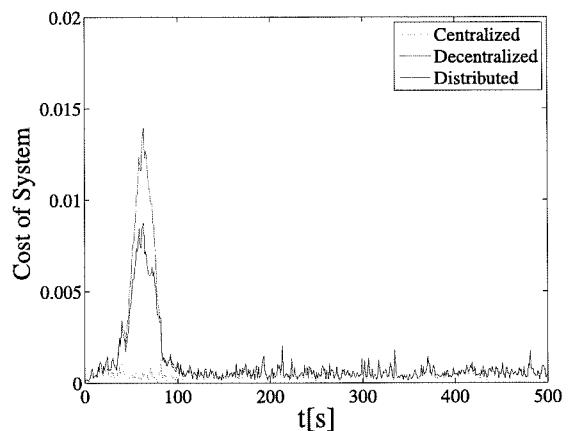


図4 評価関数の比較：集中制御と分散制御 (Decentralized and Distributed Controls)

情報を交換し使用できる場合(Distributed Control)、コントローラ間の情報交換がない場合(Decentralized Control)に関して検証を行う(図3参照)。3つのコントローラにおいて、状態フィードバックゲインを反復的に計算し、逐次的にゲインを更新するものとする。また反復時間  $N$  は5とする。シミュレーションはMatlab 2007aの環境で、サンプリング時間1[s]の固定ステップで3600[s]行った。

集中制御と分散制御(Decentralized ControlとDistributed Control)のコスト関数の比較を行った結果を図4に示す。Decentralized Control, Distributed Control, 集中制御の順に評価関数が低くなっているが、当然ながら評価関数からは集中制御が一番性能が良くなっているが、情報交換を行ったDistributed ControlがDecentralized Controlよりも性能が良いことが確認されたことが重要である。電力ネットワークが大規模化するほど分散型制御の導入は必須である。

## 4. 情報結合構造を有するシステム

前章までは一般の分散線形システムの表現とそのシステムに対して反復勾配法を用いた分散制御の手法について述べたが、本章では情報結合構造を有するシステムに対する有限時間最適制御問題に対する予測制御手法について述べる。

まずつきの  $n$  個の線形時不変システムを考える.

$$\begin{aligned} z_i(t+1) &= A_i z_i(t) + A_{ij} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} z_j(t) + B_i u_i(t) + F_i w_i(t) \\ y_i(t) &= C_i z_i(t) + v_i(t), \quad i \in \mathcal{V} := \{1, \dots, n\} \end{aligned} \quad (14)$$

ただし  $t \in \mathbb{Z}_+$ ,  $z_i(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$  は状態,  $u_i(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$  は入力,  $y_i(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$  は出力,  $w_i(t) \in \mathbb{R}^{n_w}$  と  $v_i(t) \in \mathbb{R}^{n_v}$  は平均 0 の白色ノイズである.

サブシステム (14) をまとめ, 1つの全体システムとして表現すると以下のようにになる.

$$z(t+1) = A_z z(t) + B_z u(t) + F_z w(t), \quad (15a)$$

$$y(t) = C_z z(t) + v(t), \quad (15b)$$

ここで

$$\begin{aligned} z &:= \begin{bmatrix} z_1^T & \cdots & z_n^T \end{bmatrix}^T, \quad u := \begin{bmatrix} u_1^T & \cdots & u_n^T \end{bmatrix}^T, \\ y &:= \begin{bmatrix} y_1^T & \cdots & y_n^T \end{bmatrix}^T, \quad w := \begin{bmatrix} w_1^T & \cdots & w_n^T \end{bmatrix}^T, \\ v &:= \begin{bmatrix} v_1^T & \cdots & v_n^T \end{bmatrix}^T. \end{aligned}$$

ただし  $A_z$  の  $(i, j)$  要素は以下で表現され,

$$(A_z)_{ij} = \begin{cases} A_i, & \text{if } i = j \\ A_{ij}, & \text{if } j \in \mathcal{N}_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

同様に  $B_z, F_z, C_z$  は以下で与えられる.

$$\begin{aligned} B_z &:= \begin{bmatrix} B_1^T & \cdots & B_n^T \end{bmatrix}^T, \quad F_z := \begin{bmatrix} F_1^T & \cdots & F_n^T \end{bmatrix}^T, \\ C_z &:= \begin{bmatrix} C_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & C_n \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

ここで, システム (15) は以下を満たすと仮定する.

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^T(s) & v^T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ww} & 0 \\ 0 & R_{vv} \end{bmatrix} \delta_{ts}, \quad (16)$$

$$\delta_{ts} = 1 \quad \text{if } t = s, \quad \delta_{ts} = 0 \quad \text{if } t \neq s, \quad (17)$$

$$\mathbf{E} w(t)x^T(s) = 0, \quad \mathbf{E} v(t)x^T(s) = 0 \quad \text{if } t \geq s.$$

本稿では統合システム (15) が情報構造を有するとして扱う. つまり空間的に分布する各々のサブシステムが結合状態によって異なる情報を制御や推定に使用する状況を考える<sup>6), 7), 9)</sup>. 文献 6), 7) のような Partially Nested 情報構造を考えると, 取得する情報はサブシステム間の通信遅延によって異なることが知られている. 特に文献 11) は情報構造が共分散拘束で与えられることを示している.

$$\mathbf{E} u_i(t)w_j^T(t-\tau) = 0 \quad \text{if } \tau \leq \text{dist}(i, j) \quad (18)$$

ここで  $\tau \in \mathbb{Z}_+$ ,  $\text{dist}(i, j)$  は結合情報を表わすグラフ  $G$ において, ノード  $j$  からノード  $i$ への最短パスの大きさを表わす. この式は  $\tau$  ステップ以上離れた制御入力と外乱に相關がないことを意味している.

(18) 式と同様に, 共分散拘束条件は観測情報と外乱の関係の表現にも適用できる.

$$\mathbf{E} y_i(t)v_j^T(t-\tau) = 0 \quad \text{if } \tau \leq \text{dist}(i, j) - 1. \quad (19)$$

これらをまとめると, 考えるシステムは (15) 式で与えられるダイナミクスと共に分散拘束 (18) と (19) を有するということができる. しかしこのままでは最適化などの定式化に必ずしも適していないため, 次節以降で制御対象の別の表現を与える.

#### 4.1 制御対象の再表現

共分散拘束 (18) と (19) を有する制御対象のモデル (15) の再表現を考える. まず拡大系の状態  $x(t)$  を以下のように定義する.

$$x(t) = \left[ z^T(t) \mid w^T(t-1) \mid w^T(t-2) \cdots w^T(t-D) \right]^T$$

ただし  $D = \max_{i, j} \text{dist}(i, j)$  である. このとき制御対象 (15) は以下で表現される.

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Fw(t), \quad (20a)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (20b)$$

ここで

$$\begin{aligned} A &:= \begin{bmatrix} A_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_z & E_z \end{bmatrix}, \quad B := \begin{bmatrix} B_z \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F := \begin{bmatrix} F_z \\ I \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C &:= \begin{bmatrix} C_z & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_z := \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_z := \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

この表現を用いると適切な  $Q_r$  を選ぶことで, 共分散拘束 (18) と (19) をまとめて以下のように定式化できる.

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}^T Q_r \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} = 0, \quad r = 1, \dots, m \quad (21)$$

ただし  $Q_r$  の構造はそれぞれの制御問題に依存する. (21) に加えて, 他の 2 つの制約条件を導入する.

最初の条件はエネルギー制約に関するもので, 以下の共分散制約で表現できる.

$$\mathbf{E} x^T(t)Q_x x(t) + u^T(t)Q_u u(t) \leq \gamma, \quad Q_x, Q_u > 0 \quad (22)$$

2つ目の条件は状態と制御入力に関するもので、以下のように表現される。

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \in \mathcal{D}, \quad (23)$$

ここで  $\mathcal{D}$  は凸多面体で、原点を内点として含み、以下で定義される。

$$\mathcal{D} := \left\{ \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \mid M_D \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \leq \mathbf{1} \right\}, \quad \mathbf{1} = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]^T \quad (24)$$

上記をまとめると、本章で扱う対象は (20) で与えられ、ただし拘束 (19) 式、(21) 式、(22) 式、(23) 式の拘束を有するとする。

## 5. 予測制御則

簡単のため、情報構造を有するシステムに状態フィードバック則 ( $C = I$  と  $v \equiv 0$  に相当) を構成する。以下の制約条件付有限時間最適制御問題を考える。

### 問題 1

$$\min_{u(0), \dots, u(N_c-1)} \mathbf{E} \left\{ x^T(N_c) P_{N_c} x(N_c) + \sum_{j=0}^{N_c-1} \left[ \begin{bmatrix} x(j) \\ u(j) \end{bmatrix}^T P \begin{bmatrix} x(j) \\ u(j) \end{bmatrix} \right] \right\} \quad (25a)$$

subject to

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Fw(k), \quad x(0) = y_0$$

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q_j \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \leq \epsilon_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (25b)$$

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} < \gamma, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_u \end{bmatrix} \quad (25c)$$

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \in \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^{n_x+n_u} \quad (25d)$$

$$\mathbf{E} x(N_c) \in \mathcal{F} \quad (25e)$$

ここで  $Q = H^T H > 0$  と  $Q_r$  は対称行列であり、 $x(0)$  は平均  $y_0$  で分散  $R_{vv}$  の確率変数である。

(25b) 式は情報構造による共分散拘束 (21) を表わすが、ここで十分小さなパラメータ  $\epsilon_j$  を導入することで制約条件を緩和している。

また (25c) 式はエネルギー制約を表わし、(25d) 式は (23) 式に対応する、状態と制御入力の期待値に対する制約、 $\mathcal{F}$  は終端制約を表わし、以下で定義される。

$$\mathcal{F} := \left\{ \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \mid M_F \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \leq \mathbf{1} \right\} \quad (26)$$

制御則は Receding Horizon 制御に従い制御入力を決定する、つまり上記の場合には初期状態  $y_0 = x(t)$  の情報を用いて問題を解き、入力信号列の最初の要素が実装され、つぎのステップでも最適制御問題を解き、それを繰り返す。

問題 1 の解を以下に示す。この問題に対して、以下の定理が成り立つ<sup>22)</sup>。

定理 1 問題 1 は以下の凸最適化問題：問題 2 に帰着される。

### 問題 2

$$\min_{s, \lambda} s \text{ subject to } \begin{bmatrix} \bar{\Phi}(\lambda) & \bar{\Psi}(\lambda) \\ * & \bar{\eta}(\lambda) + s \end{bmatrix} > 0 \quad (27)$$

ここで  $\bar{\Phi}$ ,  $\bar{\Psi}$ ,  $\bar{\eta}$  は以下で定義される。

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}(\lambda) &= \Phi + \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^{N_c} \lambda_{(N_c+1)(i-1)+k+1} H_{i,k}^u \\ &\quad + \sum_{l=0}^{N_c} \lambda_{l+1+m(N_c+1)} G_l^u, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}(\lambda) &:= \mathbf{E} \tilde{\Psi}(\lambda)/2, \\ \tilde{\Psi}(\lambda) &= \Psi + \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^{N_c} \lambda_{(N_c+1)(i-1)+k+1} \begin{bmatrix} x(0) \\ W(0) \end{bmatrix}^T H_{i,k}^{ux} \\ &\quad + \sum_{l=0}^{N_c} \lambda_{l+1+m(N_c+1)} \begin{bmatrix} x(0) \\ W(0) \end{bmatrix}^T G_l^{ux} \\ &\quad + \sum_{l=N_c+1}^{N_M} \lambda_{l+1+m(N_c+1)} A_{l-N_c}^u, \\ \bar{\eta}(\lambda) &= \mathbf{E} \begin{bmatrix} x(0) \\ W(0) \end{bmatrix}^T \tilde{\Gamma}(\lambda) \begin{bmatrix} x(0) \\ W(0) \end{bmatrix} \\ &\quad - \sum_{i=1}^m \sum_{k=0}^{N_c} \lambda_{(N_c+1)(i-1)+k+1} \epsilon_i \\ &\quad - \gamma \sum_{l=0}^{N_c} \lambda_{l+1+m(N_c+1)} \\ &\quad + \sum_{l=N_c+1}^{N_M} \lambda_{l+1+m(N_c+1)} \left( A_{l-N_c}^x \mathbf{E} \begin{bmatrix} x(0) \\ W(0) \end{bmatrix} - 1 \right) \end{aligned}$$

$\bar{\Phi}$  と  $\bar{\Psi}$  は  $\lambda$  に関して線形であるので、問題 2 は線形行列不等式条件で、既存のソルバで簡単に計算できる。

## 6. マイクログリッドへの応用と検証

提案手法の有効性を検証するため、図 5 に示すシンプルなマイクログリッドへ応用し、シミュレーションで検証する。ここで  $P_i(t)$  はサブシステム  $i$  の全エネルギー供給量、 $u_i(t)$  はサブシステム  $i$  でマイクロタービン／蓄電池などの可制御エネルギー、 $\Delta P_i(t)$  はサブシステム  $i$  での太陽

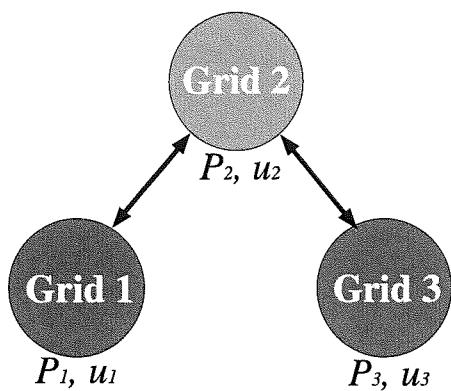


図5 マイクログリッドサブシステムの情報結合構造

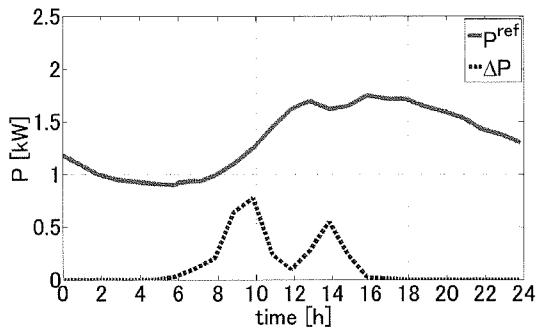


図6 発電目標量と太陽光発電量

光発電量,  $P_i^{ref}(t)$  はサブシステム  $i$  での目標エネルギー供給量とする。

するとエネルギー  $P_1$  の発展方程式は Grid 1 は Grid 2 と接続しているため、以下で表現できる。

$$P_1(t+1) = a_1 P_1(t) + a_{12} P_2(t) + u_1(t) + \Delta P_1(t) + f_1 w_1(t)$$

ここで  $a_1$ ,  $a_{12}$ ,  $b_1$ ,  $f_1$  は適当な係数で、 $w(t)$  は平均 0 の白色ノイズであり、太陽光発電量の不確かさを表わす。

制御目的は  $P_i(t)$  を目標値  $P_i^{ref}(t)$  にできるだけ一致させることである。ただし  $\Delta P_i$  は不可制御である。

$a_i = 0.3 \forall i \in \{1, 2, 3\}$ ,  $f_i = 1 \forall i \in \{1, 2, 3\}$ ,  $a_{ij} = 0.3 \forall i, j \in \{1, 2, 3\}$ .  $Q = I$ ,  $P = I$ ,  $P_{N_c} = 0$ ,  $N_c = 2$ ,  $\gamma = 1$ , 線形制約条件なし、というパラメータを設定したときのシミュレーション結果を図7に示す。ここでサンプリングタイムは 10 [分]とした。ここで太陽光発電量は 8 月の東京におけるデータを利用した<sup>23)</sup> (図6 参照)。また目標発電量  $P_i^{ref}$  は電力消費データ<sup>24), 25)</sup> を基に設定した。

提案する予測制御手法を用いたシミュレーション結果として Grid1 のデータを図7に示す。ここで  $P_i$  の初期値はすべて 0 とし、 $R_{ww} = R_{vv} = 0.01$  と設定した。

図6, 図7において実線は目標エネルギー供給量  $P_i^{ref}$  を、破線は実際のエネルギー供給量  $P_i(t)$ 、点線は  $P_i(t)$  の推定量である (moving horizon 推定器を使用)。

この結果より、太陽光発電という不可制御要素とノイズ

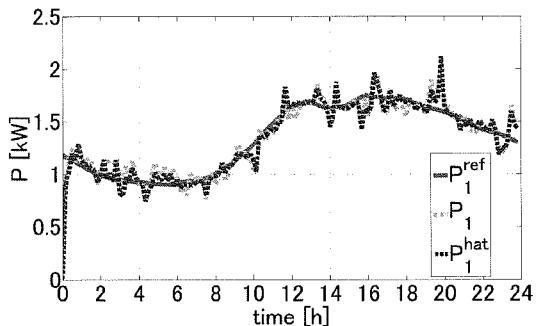


図7 Grid 1 における時間応答

があるにも関わらず、レギュレーションと状態推定が十分に行われており、提案予測制御の有効性が示されたといえよう。なお詳細については文献 22) を参照されたい。

## 7. おわりに

本稿では分散電力システムを情報結合構造を有するシステムとして表現し、それに対して、反復勾配法を用いた分散制御を適用した結果と、線形確率システムに予測制御を適用した結果について報告した<sup>19), 22)</sup>。

前半では、分散型電源を導入した電力ネットワークシステムに対して、反復勾配法に基づく分散制御を用いた系統周波数制御の適用し有効性を検証した。扱う電力ネットワークは今後普及していくと考えられる蓄電池群、ヒートポンプ群、風力発電などの分散電源が導入された系統を考え、複数連系される状況を想定している。そのような状況において発生する問題には、分散電源による逆潮流と不規則な太陽光発電、風力発電の出力が原因となる周波数変動や電圧変動がある。本稿では特に、負荷変動、風力発電の出力変動の影響を受ける周波数問題を扱った。

適用したアルゴリズムの特徴は各系統が隣接する系統と情報交換を行う事で随伴状態と状態から他系統のフィードバックゲインの推定を行い、評価関数を小さくするように勾配を求め、フィードバックゲインを更新する点にある。従来の集中型の最適制御が系統を新たに加える場合にすべての情報を測定した上で最適制御入力を求め、再設計しなくてはならなかったのに対し、適用したアルゴリズムの利点は、加えた系統に隣接する系統のコントローラの変更のみでよい。これによって既存のネットワークへの分散電源を含む小規模系統を加えた場合にも準最適運用が行える。さらに制御系設計方法の集中型と分散型 (Decentralized 型、および Distributed 型) の比較を行い反復勾配法を用いた分散制御の有効性を検証した。

後半ではマイクログリッドへの応用を目的とした予測制御手法を紹介した。情報構造を有する線形確率システムに対して、予測制御問題を制約条件付き有限時間最適制御問題として定式化した。ここで情報構造を共分散制約条件と

する方法を利用した<sup>11)</sup>。

特に本稿では制約条件付き有限時間最適制御問題が確定的凸計画問題で表現できることを示した。最後にシミュレーションで、本制御手法の有効性を簡単なマイクログリッド制御問題で検証した。

本稿では分散制御や予測制御がさまざまな興味深い性質を有しており、スマートグリッド／マイクログリッド／再生可能エネルギーなどの制御に適している可能性が示せたのではないかと思う。本稿での問題設定は、まだまだ現実的な問題に程遠いが、今回紹介した制御手法が発展し、将来的にはスマートグリッド管理運用に欠かせないキーテクノロジーとなることが期待される。

(2011年10月21日受付)

#### 参考文献

- 1) 林、岡本、林、濱坂、伊奈、坂本：スマートグリッド学 戰略・技術・方法論、日本電気協会新聞部 (2010)
- 2) 加藤、濱上：配電系統事故復旧の困難さに応じて解空間を選択的にサンプリングする遺伝的アルゴリズム、電気学会論文誌C, **131**-5, 1031/1037 (2011)
- 3) 辻田、進士、大山、辻：分散型電源の大量導入が発電出力に与える影響と電圧調整制御による効果、電気学会論文誌C, **130**-2, 216/223 (2010)
- 4) E. Bitar, P.P. Khargonekar and K. Poolla: Systems and Control Opportunities in the Integration of Renewable Energy into the Smart Grid, *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano*, 4927/4932 (2011)
- 5) N.R. Sandle and M. Athans: Solution of some nonclassical LQG stochastic decision problems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **19**-2, 108/116 (1974)
- 6) Y.C. Ho and K.C. Chu: Team decision theory and information structures in optimal control problems-part I, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **17**-1, 15/22 (1972)
- 7) Y.C. Ho: Team decision theory and information structures, *Proc. of the IEEE*, **68**-6, 644/654 (1980)
- 8) M. Rotkowitz and S. Lall: A characterization of convex problems in decentralized control, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **51**-2, 274/286 (2006)
- 9) B. Bamieh and P.G. Voulgaris: A convex characterization of distributed control problems in spatially invariant systems with communication constraints, *Systems & Control Letters*, **54**, 575/583 (2005)
- 10) A. Rantzer: Linear Quadratic Team Theory Revisited, *Proc. of the 2006 American Control Conf.*, 1637/1641 (2006)
- 11) A. Rantzer: A separation principle for distributed control, *Proc. of the 45th IEEE Conf. on Decision and Control*, 3609/3613 (2006)
- 12) A. Gattami: Generalized linear quadratic control theory, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **55**-1, 131/136 (2010)
- 13) R. Olfati-Saber, J.A. Fax and R.M. Murray: Consensus and cooperation in networked multi-agent systems, *Proc. of the IEEE*, **95**-1, 215/233 (2007)
- 14) S. Martinez, J. Cortes and F. Bullo: Motion coordination with distributed information, *IEEE Control Systems Magazine*, **27**-4, 75/88 (2007)
- 15) A. Rantzer: On prize mechanisms in linear quadratic team theory, *Proc. of the 46th IEEE Conf. on Decision and Control*, 1112/1116 (2007)
- 16) B. Johansson, A. Speranzon, M. Johansson and K.H. Johansson: On decentralized negotiation of optimal consensus, *Automatica*, **44**-4, 1175/1179 (2008)
- 17) R. Olfati-Saber: Distributed Kalman filtering for sensor networks, *Proc. of the 46th IEEE Conf. on Decision and Control*, 5492/5498 (2007)
- 18) K. Martensson and A. Rantzer: Gradient methods for iterative distributed control synthesis, *Proc. of 48th IEEE Conf. on Decision and Control and 28th Chinese Control Conf.*, 549/554 (2009)
- 19) T. Namerikawa and T. Kato: Distributed Load Frequency Control of Electrical Power Networks via Iterative Gradient Methods, *Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control*, 2011 (to be published)
- 20) 加藤、滑川：直線探索付き勾配法を用いた分散制御による電力ネットワークの系統周波数制御、第54回自動制御連合講演会論文集、2011 (to be published)
- 21) P. Kundur: *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill (1994)
- 22) T. Namerikawa, T. Hatanaka and M. Fujita: On Predictive Control for Systems with Information Structured Constraints, *SICE J. of Control, Measurement, and System Integration*, 2011 (to be published)
- 23) <http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
- 24) 滑川、藤田、武田、金尾：需要曲線の特徴を考慮した  $\mathcal{H}_\infty$  フィルタによる電力需要予測、第10回計測自動制御学会制御部門大会、181-1-3 (2010)
- 25) <http://www.fepc.or.jp/english/index.html>

#### [著者紹介]

なめり かわ とおる  
滑 川 徹 君 (正会員)



1994年金沢大学大学院自然科学研究科システム科学専攻博士課程中退。同年金沢大学工学部電気・情報工学科助手。同講師を経て2002年長岡技術科学大学機械系助教授。06年金沢大学大学院自然科学研究科電子情報科学専攻助教授を経て07年同大学理工研究域電子情報学系准教授。09年より慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科准教授となり現在に至る。ロバスト制御理論、分散協調予測制御とそのエネルギーネットワークシステムへの応用に関する究に従事。博士(工学)、電気学会、システム制御情報学会、IEEEなどの会員。