浮体式洋上ウィンドファームにおける総発電量の調整を考慮した 分散ブレードピッチ角制御

橋 本 航*・林 直 樹*
原 尚 之**・高 井 重 昌*

Distributed Blade Pitch Angle Control in Floating Offshore Wind Farm
with Coordination of Total Power Generation

Wataru HASHIMOTO*, Naoki HAYASHI*,
Naoyuki HARA** and Shigemasa TAKAI*

In this paper, we consider a distributed control approach for blade pitch control of a wind farm which consists of several floating offshore wind turbines. Each wind turbine is modeled as a discrete-time linear model based on the aerodynamics simulator for wind turbines called FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence). We formulate an optimization problem with an objective function of a quadratic form to coordinate a total power generation determined by a Transmission System Operator (TSO) while keeping fluctuation of the generator speed and oscillation of each wind turbine sufficiently small. The numerical example with the FAST simulator shows the effectiveness of the proposed distributed control method.

Key Words: floating offshore wind turbine, LQ control, distributed optimization, blade pitch angle control

1. はじめに

風力発電は化石燃料を用いる火力発電と比べて CO_2 などの温室効果ガス排出量が少ないクリーンな発電方式であり、運転コストあるいは発電コストの面からも優位性のある電源である^{1)~3)}。特に、わが国においては周囲が海に向かって開けていることから、洋上風力発電のポテンシャルがきわめて大きいと考えられている⁴⁾。しかしながら、わが国周辺には水深の浅い海域が少ないため、洋上風力発電を大規模に展開していくためには浮体式洋上風力発電の導入が不可欠である⁵⁾。

浮体式洋上風力発電は浮体上に風車を設置する洋上風力発電の一形態で、水深や海底の形状による設置場所の制限が少ないといった利点を有する一方で、波や風による浮体の動揺に伴う荷重や疲労の増加が問題点として挙げられ、これらになるべく抑制するように制御する必要がある⁶⁾。また、風車の出力は風速の3乗に比例するため、風速の変動により発電機出力も大きく変動する。これは商用系統の周波数変動の原因と

なるため、特に定格風速からカットアウト風速までの風速領域においては発電機出力をできるだけ定格値で一定に保つような制御が必要となる。これらの問題に対処する制御手法の一つに、ブレードピッチ角制御がある。ブレードピッチ角制御は風車のブレードの角度を変化させて風車の受ける風量を調整する制御手法であり、これまでにゲインスケジュールドPI制御^{7),8)}や H_∞ 制御⁹⁾、モデル予測制御¹⁰⁾、確率モデル予測制御¹¹⁾を用いた設計方法が報告されている。また、風速のリモートセンシング計測技術の一つであるLiDAR (Light detection and ranging)を用いて風速を予測し、外乱の影響を抑制する制御法^{11)~13)}も提案されている。

大型風車による風力発電を行なう際には、均等化発電原価を低く抑えるという観点から通常、多数の風車を集積させて発電するウィンドファームの形態が取られる。ウィンドファームにおいては個々の風車の制御目標を達成するだけでなく、ウィンドファーム全体としての目標を達成する必要がある。各風車の協調的な制御が必要となる。ウィンドファームにおける協調制御に関する先行研究としては、定格風速以下の風速領域での発電量最大化に関する研究^{14)~16)}が精力的に行なわれており、定格風速以上の風速領域において風車間で風速情報を交換することで浮体動揺を軽減する手法を提案した研究¹⁷⁾なども報告されているが、ブレードピッチ角の協調制御に関する検討はほとんど行なわれていない。しかしながら、定格風速以上の風速領域においても電力の需要と供給のバラ

* 大阪大学大学院工学研究科 吹田市山田丘 2-1

** 大阪府立大学大学院工学研究科 堺市中区学園町 1-1

* Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita

** Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Naka-ku Gakuen-cho, Sakai

(Received February 19, 2020)

(Revised May 11, 2020)

ンスなどの観点からウィンドファーム全体の発電量の調整を行なうなど、協調的な制御を行なうことによってより柔軟な運用が行なえるようになると考えられる。

また、大規模なウィンドファームにおいて集中的な制御を行なう場合、計算量の大きい処理を実行するために大容量のメモリや高性能な計算機が必要となる。さらに、洋上風力発電システムの制御では風車はコントロールセンタのある陸地から離れた洋上に設置されており、コントロールセンタでの集中型制御では風車とコントロールセンタとの間の通信に遅れが生じたり、パケットロスや信号の減衰などが起こりやすくなったりすることが考えられる。これに対し、分散型制御では各風車で計算を分散処理することで比較的安価な計算機で制御することができ、通信遅れなどの問題も起きにくくなる。また、通信コストの面からも優位性がある。

そこで本論文では、ウィンドファームにおける分散・協調的なブレードピッチ角制御の一検討として LiDAR などによる風速の予測値をもとに、ウィンドファームの総発電量の調節を考慮した分散・協調的なブレードピッチ角制御を行なう方法を提案し、数値シミュレーションによってその有用性を検討する。提案手法では、ウィンドファーム全体のブレードピッチ角制御をカップリング制約付きの LQ 制御問題として定式化し、これを分散最適化によって解く手法を検討する。分散最適化は最適化問題を複数のエージェントによって分担して解く手法^{18)~21)}であり、ウィンドファームを構成する各風車を各エージェントに対応させて分散最適化アルゴリズムを適用することで、ウィンドファーム全体の協調的な制御を各風車の分散的な計算処理によって実現できるようになる。

Nedićらは凸最適化問題に対して、エージェントごとの固有の目的関数の総和を分散的な計算処理によって最適化するアルゴリズムを提案し、その収束性を証明した²²⁾。このアルゴリズムはエージェントの解の推定値に制約がある場合^{23), 24)}、通信グラフが有向であったり時間変化したりする場合^{25), 26)}をはじめとしてさまざまな拡張が行なわれている。本研究では、グローバルな不等式制約を考慮した文献²⁴⁾の Distributed Lagrangian Primal-Dual Subgradient (DLPDS) アルゴリズムを適用した分散制御法を提案する。

ウィンドファーム制御の分散最適化によるアプローチとしてはほかに文献²⁷⁾があるが、これも定格以下の風速下における発電量最大化に関する研究であり、本研究で対象とする定格以上の風速に対するブレードピッチ角制御とは異なっている。

以下、本論文では2章で制御対象とする風車および浮体のモデルについて説明し、3章でウィンドファーム全体のブレードピッチ角制御のための制御器設計法について述べる。最後に4章で風車用シミュレータ FAST を用いて設計した制御器に対する非線形シミュレーションを行ない、結果の考察を行なう。

2. 風力発電システムモデル

本研究では NREL (米国国立再生可能エネルギー研究所) によって開発されたオープンソースコードである空力弾性シ

Fig. 1 NREL 5MW floating offshore wind turbine

Table 1 State variables of linear model

$x_{i,1}$	Platform horizontal surge translation
$x_{i,2}$	Platform pitch tilt rotation
$x_{i,3}$	1st tower fore-aft bending mode
$x_{i,4}$	Drivetrain rotational-flexibility
$x_{i,5}$	1st flapwise bending-mode of blade 1
$x_{i,6}$	1st flapwise bending-mode of blade 2
$x_{i,7}$	1st flapwise bending-mode of blade 3
$x_{i,8}$	Platform horizontal surge translation velocity
$x_{i,9}$	Platform pitch tilt rotation velocity
$x_{i,10}$	Derivative of 1st tower fore-aft bending mode
$x_{i,11}$	Variable speed generator velocity
$x_{i,12}$	Derivative of drivetrain rotational-flexibility
$x_{i,13}$	Derivative of 1st flapwise bending-mode of blade 1
$x_{i,14}$	Derivative of 1st flapwise bending-mode of blade 2
$x_{i,15}$	Derivative of 1st flapwise bending-mode of blade 3

ミュレータ FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structure, and Turbulence)²⁸⁾を用いて風車の線形システムモデルの作成を行なう。風車と浮体のモデルには NREL 5MW 洋上風車および OC3 spar-buoy^{29), 30)}を用いる。風車と浮体の概観および座標系を Fig. 1 に示す。FAST では指定した動作点近傍で線形システムモデルを作成することができる。本研究では文献¹¹⁾と同様に、FAST によって生成される風車の線形周期モデルの1周期分の平均をとることで得られるつぎの連続時間線形時不変システムを考える。

$$\dot{x}_i(t) = A_i^c x_i(t) + B_{ui}^c u_i(t) + B_{wi}^c w_i(t) \quad (1)$$

ここで、 $A_i^c \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_{ui}^c \in \mathbb{R}^n$, $B_{wi}^c \in \mathbb{R}^n$ であり、 $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$, $u_i(t) \in \mathbb{R}$, $w_i(t) \in \mathbb{R}$ はそれぞれ風車 i の状態、制御入力 (ブレードピッチ角の指示値)、外部入力 (風車を通過する風の速度) である。状態 $x_i(t)$ には、FAST によって考慮することができる 22 自由度のうち、Table 1 に示す 15 個の変数を選んだ ($n = 15$)。また、これらの変数は風速 18 m/s のときの平衡点 $x_i^e(t)$, $u_i^e(t)$, $w_i^e(t)$ との偏差を表わしている。

Fig. 2 Wind turbine array

本論文では、(1) 式を離散化した以下の離散時間線形モデル、(2) 式を風車の予測モデルとして用いる。離散化におけるサンプリング周期は制御性能と実システムで想定されるハードウェアの性能とのバランスを取って $\Delta t = 0.125 \text{ s}$ とした。

$$x_i[k+1] = A_i x_i[k] + B_{ui} u_i[k] + B_{wi} w_i[k] \quad (2)$$

ただし、 $x_i[k] = x_i(k\Delta t) \in \mathbb{R}^n$, $u_i[k] = u_i(k\Delta t) \in \mathbb{R}$, $w_i[k] = w_i(k\Delta t) \in \mathbb{R}$, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_{ui} \in \mathbb{R}^n$, $B_{wi} \in \mathbb{R}^n$ である。

本研究では前述の NREL 5MW および OC3 spar-buoy からなる風力発電システムを Fig. 2 に示すように、風向きと平行に $D [\text{m}]$ ごとの等間隔で N 台配置した状況を想定し、定格風速 (11.4 m/s) 以上、カットアウト風速 (25 m/s) 以下の風速領域 (Region 3) において協調的にブレードピッチ角制御を行なうことを考える。なお、Region 3 では、発電機トルク一定制御、もしくは、発電量一定制御が典型的な方策であるが、ベースライン制御器³⁰⁾で一定トルク制御が採用されているため、それにならって以下の議論においては発電機トルクを常に一定に保つ一定トルク制御を仮定する。NREL 5MW は可変速風車でありトルク制御可能な発電機構成を想定しているため、このような制御が可能であるが、仮にアクティブなトルク制御ができないタイプの誘導発電機を用いる場合においても発電機トルクを発電機速度の関数として線形化することで特に手法の拡張なしに本論文の方法を適用することができる。

3. 制御器設計

本章では、ウィンドファーム内全風車のブレードピッチ角制御を分散協調的に行なうための制御器の設計法について述べる。

3.1 総発電量の調整を考慮したブレードピッチ角制御

本研究で対象とする Region 3 における主な制御目標は

- (i) 各風車における発電量の定格値 (5 MW) 付近への維持
- (ii) 浮体動揺の抑制
- (iii) ウィンドファーム全体の発電量の協調的な調整

である。制御目標 (i) は発電機トルク一定の条件下では発電機速度を定格値 (1173.6 rpm) 付近に保つことと同義であり、発電機速度に対応する状態変数 ($x_{i,11}$) が小さい値となるように制御することで達成することができる。

制御目標 (ii) に関しては、一般に浮体自由度のうち特に浮

体ピッチ運動を陽に考慮し、浮体ピッチ角の変化を十分に小さく保つことが浮体動揺の抑制のために重要であるとされている⁵⁾ことから、浮体ピッチ角に対応する状態変数 ($x_{i,2}$) が十分に小さい値となるように制御することで達成する。

制御目標 (iii) については本研究においては TSO よりウィンドファーム総発電量の上限値が与えられた場合を想定し、後述の全風車の発電機速度の総和に対するカップリング不等式制約 (8) を設けることで考慮する。

以上のことを踏まえ、本論文ではウィンドファームにおけるブレードピッチ角制御を以下の LQ 制御問題として定式化する。

$$\underset{u \in \mathbb{R}^{NT}}{\text{minimize}} \quad \sum_{i=1}^N J_i(u) \quad (3a)$$

subject to

$$x_i[k+1] = A_i x_i[k] + B_{ui} u_i[k] + B_{wi} w_i[k] \quad (3b)$$

$$x_i[0] = x_{i0}, \quad i \in \mathcal{V} \quad (3c)$$

$$x_i[k] \in \mathcal{X}_i, \quad i \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K} \quad (3d)$$

$$u_i[k] \in \mathcal{U}_i, \quad i \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K} \quad (3e)$$

$$h(x_1[k], x_2[k], \dots, x_N[k]) \in \mathcal{X}_C, \quad i \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K} \quad (3f)$$

ここで、 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ は風車の集合、 $\mathcal{K} = \{0, 1, \dots, T-1\}$ は予測時間の集合、 $T > 1$ はホライズンの区間長である。また、

$$J_i(u) = \sum_{\tau=0}^{T-1} (x_i^\top[\tau] Q_i x_i[\tau] + u^\top[\tau] R_i u[\tau]) + x_i^\top[T] Q_{f_i} x_i[T] \quad (4)$$

は風車 i のコスト関数、 $u[k] \in \mathbb{R}^N$ は時刻 k での全風車の入力を表わすベクトルで、 u は $u[k]$ を全ホライズンにわたって並べたベクトル $u = [u^\top[0], u^\top[1], \dots, u^\top[T-1]]^\top \in \mathbb{R}^{NT}$ である。 $Q_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $R_i \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $Q_{f_i} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は状態、入力および終端状態の重みを表わす正定行列である。Table 1 に挙げた状態 x_i に関する 15 個の変数は定格風速 18 m/s における平衡点との偏差を表わしており、コスト関数 (4) を小さくすることで、状態変数の各値を平衡点 (目標値) に近づけるように制御できる。また、コスト関数 (4) はより柔軟な調節が行なえるよう全状態変数を含んだ形になっているが、設計時には基本的に発電機速度および浮体ピッチ角に対応する要素を大きく重みづけし、制御目標 (i), (ii) を達成する。

$\mathcal{X}_i \subset \mathbb{R}^n$ は風車 i の状態に関する制約集合、 $\mathcal{U}_i \subset \mathbb{R}$ は入力に関する制約集合、関数 h はカップリング制約関数、 $\mathcal{X}_C$ は関数 h の制約集合である。本研究では制約 (3d)~(3f) に対応して、ブレードピッチ角、浮体ピッチ角、発電機速度および全風車の発電機速度の和に対してそれぞれ以下の制約を課す。

$$\Delta u_{i,\min} \leq \Delta u_i[k] \leq \Delta u_{i,\max}, \quad i \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K}' \quad (5)$$

$$\Pr(\theta_i[k] < \theta_{\max}) \geq p_1, \quad i \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K}' \quad (6)$$

$$\Pr(\Omega_i[k] < \Omega_{\max}) \geq p_2, \quad i \in \mathcal{V}, k \in \mathcal{K}' \quad (7)$$

$$\Pr\left(\sum_{i=1}^N \Omega_i[k] < \Omega_{\text{sum}}\right) \geq p_3, \quad k \in \mathcal{K}' \quad (8)$$

ただし、 $\mathcal{K}' = \{1, 2, \dots, T\}$ であり、 $\Delta u_i[k] = u_i[k] - u_i[k-1]$ は一時刻前の入力との差、 $\Pr(x < a) \in [0, 1]$ は $x < a$ となる確率、 $p_1, p_2, p_3 \in [0, 1]$ は所与の確率、 θ_i および Ω_i はそれぞれ風車 i の浮体ピッチ角および発電機速度で、 $x_{i,2}, x_{i,11}$ のそれぞれに平衡点における値を加算した変数である。(5) 式は風車のブレードピッチアクチュエータの性能を考慮してブレードピッチ角の一時刻前との変化速度を制限する制約、(6) 式は浮体ピッチ角が一定以上振れないようにするための制約、(7) 式は各風車の発電機速度の定格値との偏差 $x_{i,11}$ を Ω_{max} 以下に抑えるための制約、(8) 式は発電機速度の和が一定値 Ω_{sum} を超えないようにするための制約である。個々の風車の発電機速度および浮体ピッチ角は主に重み行列を調整することによって考慮するが、風車の安全性確保の観点から制約(6)と(7)を設けている。また、最後の発電機速度の和に関する制約は制御目標(iii)に対応する全風車でカップリングされた制約となっており、この制約を満たすために各風車を協調的に制御する必要が生じる。

3.2 分散最適化による求解

本節では分散最適化アルゴリズムを用いて最適化問題(3)を解くことで、ウィンドファーム全体の制御を各風車での分散処理によって行なう方法を述べる。まず、最適化問題(3)を以下の二次計画問題に帰着させる。

$$\underset{\tilde{u} \in \mathbb{R}^{NT}}{\text{minimize}} \quad f(\tilde{u}) = \sum_{i=1}^N f_i(\tilde{u}) \quad (9a)$$

$$\text{subject to} \quad M\tilde{u} \leq \zeta \quad (9b)$$

ただし、 $\tilde{u}$ は評価区間内の全時刻、全風車の制御入力を並べたベクトルであり、 $\hat{u}_i = [u_i[0], u_i[1], \dots, u_i[T-1]]^\top \in \mathbb{R}^T$ を用いて $\tilde{u} = [\hat{u}_1^\top, \hat{u}_2^\top, \dots, \hat{u}_N^\top]^\top \in \mathbb{R}^{NT}$ と表わされる。また、

$$f_i(\tilde{u}) = \tilde{u}^\top H_i \tilde{u} + 2h_i^\top \tilde{u} \quad (10)$$

であり、 $H_i \in \mathbb{R}^{NT \times NT}$ 、 $h_i \in \mathbb{R}^{NT}$ は風車のダイナミクスを表わす行列 A_i 、 B_{ui} 、 B_{wi} および風速の予測値 $w_i[k]$ で決まる行列およびベクトルである。 H_i および h_i の具体的な形については付録で述べる。また、 $M \in \mathbb{R}^{m \times NT}$ 、 $\zeta \in \mathbb{R}^m$ はシステムの行列、風速の予測値、機会制約を満たす確率によって決まる行列およびベクトルである。なお、最適化問題(3)における状態制約は機会制約であったが、LiDARの予測誤差の確率分布が正規分布に従う場合、確定的な制約に変形できることが文献(31)によって報告されており、本研究ではこれを用いて不等式制約(9b)の導出を行なった。

本論文では、最適化問題(9)に対し、以下の仮定をおく³²⁾。

【仮定1】 $g(\tilde{u}) < 0$ を満たすベクトル $\tilde{u} \in \tilde{\mathcal{X}}$ が存在する。ただし、 $g(\tilde{u}) = M\tilde{u} - \zeta$ であり、 $\tilde{\mathcal{X}}$ は入力 $\tilde{u}$ に関する制約集合である。

本研究では不等式制約付きの凸最適化問題に対する分散最

適化アルゴリズムとして DLPDS アルゴリズム²⁴⁾を採用する。今、主問題(9a)、(9b)に対する双対問題

$$\underset{\mu \in \mathbb{R}_{\geq 0}^N}{\text{maximize}} \quad \left\{ \inf_{\tilde{u} \in \tilde{\mathcal{X}}} \mathcal{L}(\tilde{u}, \mu) \right\} \quad (11)$$

を考える。ただし、 $\mathcal{L}(\tilde{u}, \mu) = f(\tilde{u}) + N\mu^\top g(\tilde{u})$ は(9)式に対するラグランジュ関数、 $\tilde{\mathcal{X}}$ は制約集合である。各風車は、主問題の最適解 $\tilde{u}^*$ と双対問題の最適解 μ^* の推定値 $\tilde{u}_i[s]$ と $\mu_i[s]$ を保有する。そして、アルゴリズムの各ステップ $s \in \mathbb{N} = \{0, 1, \dots\}$ において、通信ネットワークでつながっているほかの風車とこれらの推定値の情報交換を行なう。本論文では、風車間の通信についてつぎの仮定をおく。

【仮定2】 風車間の通信は固定な連結グラフ $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ で表わされる。ただし、 $\mathcal{V}$ は風車の集合、 $\mathcal{E}$ は風車間の通信路の集合である。

各風車は情報交換の後、次式により、推定値を更新する。

$$v_{\tilde{u}}^i[s] = \sum_{j=1}^N a_{ij} \tilde{u}_j[s] \quad (12a)$$

$$v_{\mu}^i[s] = \sum_{j=1}^N a_{ij} \mu_j[s] \quad (12b)$$

$$\tilde{u}_i[s+1] = P_{\tilde{\mathcal{X}}_i} [v_{\tilde{u}}^i[s] - \alpha_{\tilde{u}}[s] \mathcal{D}_{\tilde{u}}^i[s]] \quad (12c)$$

$$\mu_i[s+1] = P_{\mathcal{M}_i} [v_{\mu}^i[s] + \alpha_{\mu}[s] \mathcal{D}_{\mu}^i[s]] \quad (12d)$$

ここで、 a_{ij} は風車 i が風車 j の推定値に割り当てる重み、 $\mathcal{D}_{\tilde{u}}^i[s]$ 、 $\mathcal{D}_{\mu}^i[s]$ はそれぞれ風車 i のラグランジュ関数 $\mathcal{L}_i(\tilde{u}, \mu) = f_i(\tilde{u}) + \mu^\top g(\tilde{u})$ の点 $(v_{\tilde{u}}^i[s], v_{\mu}^i[s])$ における $\tilde{u}$ および μ に関する劣勾配、 $\tilde{\mathcal{X}}_i$ は $\tilde{u}_i$ に対する閉凸な制約集合、 $\tilde{\mathcal{X}} = \bigcap_{i \in \mathcal{V}} \tilde{\mathcal{X}}_i$ 、 $\mathcal{M}_i$ は風車 i がもつ双対問題(11)の最適解の集合 $\mathcal{D}_{\mathcal{L}}^*$ の閉凸な上位集合³³⁾である。また、 $P_{\tilde{\mathcal{X}}_i}[\cdot]$ および $P_{\mathcal{M}_i}[\cdot]$ はそれぞれ制約集合 $\tilde{\mathcal{X}}_i$ と $\mathcal{M}_i$ への射影を表わす。本論文ではさらに以下の仮定をおく。

【仮定3】 任意の $i \in \mathcal{V}$ に対して $a_{ii} \geq \eta$ を満たし、かつ任意の $\{i, j\} \in \mathcal{E}$ 、 $i \neq j$ に対して $a_{ij} \geq \eta$ を満たす $\eta > 0$ が存在する。

【仮定4】 すべての $i \in \mathcal{V}$ に対して $\sum_{j=1}^N a_{ij} = 1$ を満たし、すべての $j \in \mathcal{V}$ で $\sum_{i=1}^N a_{ij} = 1$ を満たす。

【仮定5】 ステップサイズ $\alpha[s]$ が次式を満たす。

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \alpha[s] = 0, \sum_{s=0}^{+\infty} \alpha[s] = +\infty, \sum_{s=0}^{+\infty} \alpha^2[s] < +\infty$$

仮定1～5のもとで更新式(12)に従って更新を行なうことで、 $\tilde{u}_i[s]$ および $\mu_i[s]$ はエージェント同士で合意を達成し、ラグランジュ関数 $\mathcal{L}(\tilde{u}, \mu)$ の $\tilde{\mathcal{X}} \times \mathcal{M}$ 上の鞍点の一つ $(\tilde{u}^*, \mu^*)$ に収束し、この鞍点が主問題および双対問題の最適解と一致することが文献(24)において証明されている。ここで、 $\mathcal{M} = \bigcap_{i \in \mathcal{V}} \mathcal{M}_i$ である。

最後に、これまでの議論のまとめとして、各風車における手続きを Algorithm 1 に示す。

4. FAST による非線形シミュレーション

前章までに述べた提案手法の有用性を確かめるため、FAST

Algorithm 1 Procedure of wind turbine i

- 1: **Step1:** Acquire $w_i[k]$, $k \in \mathcal{K}$ from LiDAR.
- 2: **Step2:** Compute H_i , h_i , M and ζ of Eqs. (9b), (10).
- 3: **Step3:** DLPDS algorithm
- 4: **Initialization:** $\tilde{u}_i(0) \in \tilde{\mathcal{X}}_i$, $\mu_i[0] \in \mathcal{M}_i$
- 5: **For** $s \in \mathbb{N}$
- 6: Send $\tilde{u}_i[s]$ and $\mu_i[s]$ to the neighbor wind turbines.
- 7: Receive $\tilde{u}_j[s]$ and $\mu_j[s]$ from the neighbor turbines.
- 8: Update $\tilde{u}_i[s+1]$ and $\mu_i[s+1]$ by Eq. (12).
- 9: **EndFor**

Fig. 3 Wind speed of wind turbine 1

による非線形シミュレーションを行なう。本シミュレーションでは、風車数 $N = 3$ 、風車間の間隔 $D = 756$ m、ホライズン長を 30 s ($T = 240$) と定める。また、提案手法により各風車が協調的に制御されることを確認するために、**Fig. 3** のような波形の風が風車 1 を通過する場合を考える。この例は、時刻 15 s 付近において、20.2 m/s 程度の突風が風車 1 を通過する状況となっている。このとき、各風車を通過する風の速度は、風の伝搬遅延と LiDAR による風速の予測誤差を考慮した以下で与えられるとする。

$$V_i[k] = w_1[k - (i - 1)T_s] + e_i[k], \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

ただし、 $w_1[k]$ は LiDAR が予測する時刻 k で風車 1 を通過する風の速度であり、 $e_i[k]$ は平均 0、分散 0.5 の正規分布に従う確率変数、 $T_s = 60$ s は後方の風車に到達するまでの風の伝搬時間である。なお、風が風車を通過する際には一般に風車の風下において風速の減少が生じる¹⁵⁾が、本研究のようにブレードピッチ角制御によって大きく風をそらす場合には風車後方に生じる風況の乱れ（ウェイク）による影響は限定的であることが知られており¹⁷⁾、本研究においても風車通過時の風の速度低減などは無視できると仮定する。

提案手法における各パラメータに関しては、LQ 制御の重み行列 Q_i , R_i , Q_{f_i} を **Table 2** のように決め、分散最適化アルゴリズム (DLPDS) の更新式における重み行列 $A = [a_{ij}]$ を

$$A = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0 & 0.3 & 0.7 \end{bmatrix} \quad (14)$$

とし、ステップサイズは $\alpha_{\tilde{u}}[s] = 1/(s + 7 \times 10^5)$, $\alpha_{\mu}[s] =$

Table 2 Weighting matrix

$Q_i = \text{blkdiag}(Q_a, Q_b)$
$Q_a = \text{diag}(0.1, 6 \times 10^6, 0.1, 10, 1, 1, 1)$
$Q_b = \text{diag}(1, 10^4, 1, 5 \times 10^4, 10, 1, 1, 1)$
$R_i = \text{diag}(5 \times 10^3, 5 \times 10^3, 5 \times 10^3)$
$Q_{f_i} = Q_i$

Table 3 Parameter of constraints

$\Delta_{\max} = -\Delta_{\min} = 1$ [rad]
$\theta_{\max} = \text{Operating Point} + 0.01$ [rad]
$\Omega_{\max} = \text{Rated Value} + 26.3$ [rpm]
$\Omega_{\text{sum}} = \text{Rated Value} + 30$ [rpm]
$p_1 = p_2 = 0.7, p_3 = 0.95$

Fig. 4 Blade pitch angle of wind turbine 1 **Fig. 5** Blade pitch angle of wind turbine 2

$1/(s + 5 \times 10^2)^{0.51}$ と決める。また、ブレードピッチ角、浮体ピッチ角、全風車の発電機速度の和に課す制約式 (5)~(8) の各定数を **Table 3** のように設定した。アルゴリズムは約 4000 回の反復によって最適解に収束し、その結果得られた制御入力および当該制御入力を FAST の非線形モデルに加えた際の各状態の波形を示す。

まず、**Fig. 4**~**Fig. 6** に各風車のブレードピッチ角（制御入力）を示す。風車 1 のブレードピッチ角は風車 1 の風速の予測値 (**Fig. 5**) とほぼ同じように変化していることが読み取れ、風速の増加に伴う発電機速度の増加を防ぐためにブレードピッチ角を大きくして風をそらすように動作していることがわかる。風車 2 および 3 には平衡点で一定の風速 (18 m/s)

Fig. 6 Blade pitch angle of wind turbine 3

Fig. 7 Generator speed of wind turbine 1

Fig. 8 Generator speed of wind turbine 2

Fig. 9 Generator speed of wind turbine 3

の予測値しか与えていないので、風車間の協調を考慮せずに独立に制御する場合にはブレードピッチ角を平衡点から動かす必要はないが、Fig. 5, Fig. 6 では風車 1 に突風が入るタイミングで風車 2 および 3 のブレードピッチ角も大きくしてあえて風をそらす動作をしていることが確認できる。これは発電機速度総和の制約を満たすための協調動作となっている。

つぎに、各風車の発電機速度およびその総和を Fig. 7～Fig. 10 に示し、総発電量を Fig. 11 に示す。各図の横線は定格速度または発電量の定格値を表わしている。風車 1 は前述のとおり突風のタイミングで大きく風をそらす動作をしているものの、発電機速度は突風が入るあたりの時刻において定格値 1173.6 rpm よりも 30 rpm 程度大きい値を取っている。これは $\omega_{\max} = 26.3 \text{ rpm}$ を超えているが、確率制約は満たしている。一方、風車 2 および 3 はブレードピッチ角に対応して風車 1 の発電機速度が増加するタイミングで発電機速度を減少させることで発電機速度の総和に関する制約を満たすように制御されていることがわかる。その結果として、発電機速度の和はどの時刻においても定格値 (3520.8 rpm) からの偏差は 30 rpm 以下となっており、制約 (8) を満たしていることが確認できる。これに対応して Fig. 11 から、総発電量は定格値からの偏差が 0.12 MW 以内に収まっていることが確認できる。

最後に、Fig. 12 に各風車の浮体ピッチ角を示す。いずれの風車も平衡点における値からの変動の大きさは 0.04 deg 程

Fig. 10 Sum of generator speed

Fig. 11 Total power generation of wind farm

Fig. 12 Platform pitch angle

度に収まっており、十分に小さい値に抑えられていることが確認できる。

5. おわりに

本論文では、ウィンドファームのブレードピッチ角制御をカップリング制約付きの LQ 制御問題として定式化し、分散最適化を用いて求解することで各風車の分散的な計算処理によって個々の風車の発電機速度および浮体ピッチ角の変動を抑えつつ、ウィンドファーム全体の発電量を調整する制御方法を提案した。また、FAST によるシミュレーションの結果からウィンドファーム内の各風車が相互に協調して発電量の総和に課した制約を満たすように動作していることが確認できた。今後の課題としては問題 (9) の低次元化および解法的高速化によって本論文の手法をより実証的な運用に適したアルゴリズムにすること、提案法をモデル予測制御へ応用することによりブレードピッチ角の継続的なフィードバック制御を実現することなどが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17K14701 ならびに JP20K04539 の助成を受けて行なわれました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 牛山 泉：風車工学入門，森北出版 (2002)
- 2) K.E. Johnson, L.Y. Pao, M.J. Balas and L.J. Fingersh: Control of variable-speed wind turbines: Standard and adaptive techniques for maximizing energy capture, *IEEE Control Systems Magazine*, **26**-3, 70/81 (2006)
- 3) S. Boersma, B.M. Doekemeijer, P.M.O. Gebrard, P.A. Fleming, J. Annoni, A.K. Scholbrock, J.A. Frederik and J-W. van Wingerden: A tutorial on control-oriented modeling and control of wind farms, *Proc. 2017 American Control Conference*, 1/18 (2017)
- 4) 環境省：平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書，<https://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/>
- 5) 原，大塚：浮体式洋上風力発電における制御，システム/制御/情報，**60**-9, 388/395 (2016)
- 6) 山田，上野，羽田，中條，大塚：浮体式洋上風力発電施設におけるタワー基部の曲げモーメントを評価したモデル予測制御，システム制御情報学会論文誌，**30**-9, 356/365 (2017)
- 7) M.M. Hand: Variable-speed wind turbine controller systematic design methodology, NREL Technical Report,

- NREL/TP-500-25540 (1999)
- 8) A.D. Wright and L.J. Fingersh: Advanced control design, implementation, and initial tests, NREL Technical Report, NREL/TP-500-42437 (2008)
- 9) 辻本，デソール，原，小西： H_{∞} 制御を用いた浮体式洋上風力発電のピッチ角制御，電気学会論文誌 C，**134**-8, 1096/1103 (2014)
- 10) S. Dessort, S. Tsujimoto, N. Hara and K. Konishi: Blade pitch angle control for floating offshore wind turbines by model predictive control, 電気学会論文誌 C，**135**-7, 882/892 (2015)
- 11) 渡邊，原，小西：浮体式洋上風車に対する確率モデル予測制御を用いたブレードピッチ角制御の一検討，第 60 回自動制御連合講演会，SaA3-5 (2017)
- 12) S. Raah, D. Schlipf, F. Sandner, D. Matha and P.W. Cheng: Nonlinear model predictive control of floating wind turbines with individual pitch control, *Proc. American Control Conference*, 4434/4439 (2014)
- 13) M. Harris, M. Hand and A. Wright: Lidar for turbine control, NREL Technical Report, NREL/TP-500-39154 (2006)
- 14) M.A. Ahmad, S. Azuma and T. Sugie: A model-free approach for maximizing power production of wind farm using multi-resolution simultaneous perturbation stochastic approximation, *Energies*, **7**-9, 5624/5646 (2014)
- 15) L. Buccafusca and L. Beck: Maximizing power in wind turbine arrays with variable wind dynamics, *Proc. 57th IEEE Conference on Decision and Control*, 17/19 (2018)
- 16) S.S. Minna, F.D. Bianchi and M.D. Gil: A wind farm control strategy for power reserve maximization, *Renewable Energy*, **3**, 37/44 (2019)
- 17) M. Kristalny and D. Madjidian: Decentralized feedforward control of wind farms: Prospects and open problems, *Proc. 50th IEEE Conference on Decision and Control*, 12/15 (2011)
- 18) 畑中健志：マルチエージェントシステムの制御—VI 分散最適化，システム/制御/情報，**58**-3, 124/131 (2014)
- 19) 小野峻佑：近接分離による分散凸最適化—交互方向乗数法に基づくアプローチを中心として—，計測と制御，**55**-11, 954/959 (2016)
- 20) 桜間一徳：大規模システムのネットワーク分散最適化，計測と制御，**56**-12, 949/954 (2017)
- 21) 林 直樹：マルチエージェントネットワーク上の分散凸最適化，システム/制御/情報，**63**-11, 467/473 (2019)
- 22) A. Nedic and A. Ozdaglar: Distributed subgradient methods for multi-agent optimization, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **55**-4, 48/61 (2009)
- 23) A. Nedic, A. Ozdaglar and P.A. Parrilo: Constrained consensus and optimization in multi-agent networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **54**-1, 922/938 (2010)
- 24) M. Zhu and S. Martinez: On distributed convex optimization under inequality and equality constraints, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **57**-1, 151/164 (2011)
- 25) A. Nedic and A. Olshevsky: Distributed optimization over time-varying directed graphs, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **60**-3, 601/615 (2015)
- 26) A. Nedic and I. Lobel: Distributed optimization over random networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **56**-6, 1291/1306 (2011)
- 27) N. Hara and K. Konishi: A preliminary study on power maximization of wind farm using distributed optimization, *Proc. SICE Annual Conference 2019*, 1681/1684 (2019)
- 28) J. Jonkman and M. Buhl: FAST user's guide, NREL Technical Report, NREL/TP-500-38230 (2005)
- 29) J. Jonkman and S. Butterfield: Definition of a 5-MW refer-

ence wind turbine for offshore system development, NREL Technical Report, NREL/TP-500-30060 (2009)

- 30) J. Jonkman: Definition of the floating system for phase IV of OC3, NREL Technical Report, NREL/TP-500-47535 (2010)
- 31) 橋本智昭：確率モデル予測制御問題の解法における機会制約の変形法, システム/制御/情報, **61**-2, 63/68 (2017)
- 32) 福島雅夫：非線形最適化の基礎, 朝倉書店 (2001)
- 33) M. Zhu and S. Martinez: On distributed convex optimization under inequality and equality constraints via primal-dual subgradient methods, arXiv:1001.2612 (2010)
- 34) F. Borrelli, A. Bemporad and M. Morari: *Predictive Control for Linear and Hybrid Systems*, Cambridge Univ. Press (2017)

【付 録】

A. H_i および h_i の導出結果

(9) 式における H_i および h_i は文献 34) と同様の式変形を行なうことで以下のように導出することができる。

$$\begin{aligned}
 H_i &= \sum_{\tau=0}^{T-1} (\hat{E}_{ui}^\top \Phi_{ui}^\top[\tau] Q_i \Phi_{ui}[\tau] \hat{E}_{ui} + \tilde{E}^\top[\tau] R_i \tilde{E}[\tau]) \\
 &\quad + \hat{E}_{ui}^\top \Phi_{ui}^\top[T] Q_{f_i} \Phi_{ui}[T] \hat{E}_{ui} \\
 h_i &= \hat{E}_{ui}^\top \left(\sum_{\tau=0}^{T-1} \Phi_i[\tau] Q_i A_i^\tau x_i[0] \right)^\top \\
 &\quad + \hat{E}_{ui}^\top \Phi_i^\top[T] Q_{f_i} A_i^T x_i[0] + W_i^\top \tilde{w}
 \end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 W_i &= \sum_{\tau=0}^{T-1} (\hat{E}_{wi}^\top \Phi_{wi}^\top[\tau] Q_i \Phi_{wi}[\tau] \hat{E}_{ui}) \\
 &\quad + \tilde{w}^\top \hat{E}_{wi}^\top \Phi_{wi}^\top[T] Q_{f_i} \Phi_{ui}[T] \hat{E}_{ui}
 \end{aligned}$$

であり,

$$\begin{aligned}
 \Phi_{ui}[k+1] &= [A_i^k B_{ui}, A_i^{k-1} B_{ui}, \dots, B_{ui}, O_{N \times (T-k-1)}] \\
 \Phi_{wi}[k+1] &= [A_i^k B_{wi}, A_i^{k-1} B_{wi}, \dots, B_{wi}, O_{N \times (T-k-1)}] \\
 w_i &= [w_i[0], w_i[1], \dots, w_i[T-1]]^\top \\
 \tilde{w} &= [w_1^\top, w_2^\top, \dots, w_N^\top]^\top \\
 \hat{E}_{ui} &= [O_{T \times T(i-1)}, I_T, O_{T \times T(N-i)}] \\
 \hat{E}_{wi} &= [O_{T \times T(i-1)}, I_T, O_{T \times T(N-i)}] \\
 E[k] &= [O_{1 \times (k-1)}, 1, O_{1 \times (T-k)}] \\
 \tilde{E}(k) &= \begin{bmatrix} E[k] \hat{E}_{u1} \\ E[k] \hat{E}_{u2} \\ \vdots \\ E[k] \hat{E}_{uN} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

である。

【著 者 紹 介】

橋 本 航

2019 年立命館大学理工学部電気電子工学科卒業。同年大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻修士課程入学, 現在に至る。分散最適化, ウィンドファームの協調制御に関する研究に従事。

林 直 樹 (正会員)

2011 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。同年京都大学大学院情報科学研究科研究員, 2012 年大阪大学大学院工学研究科助教となり現在に至る。協調制御, 分散最適化などの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE の会員。

原 尚 之 (正会員)

2003 年東京都立科学技術大学工学部電子システム工学科卒業。2008 年首都大学東京大学院工学研究科博士後期課程修了。同年大阪府立大学大学院工学研究科助教。2014 年同准教授, 現在に至る。予測制御の理論・応用, 浮体式風車の制御などの研究に従事。博士 (工学)。電気学会, 電子情報通信学会, 日本風力エネルギー学会, IEEE などの会員。

高 井 重 昌 (正会員)

1991 年神戸大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程修了。92 年大阪大学工学部助手, 98 年和歌山大学システム工学部講師, 99 年同助教授, 2004 年京都工芸繊維大学工学部助教授, 2007 年同大学院工学研究科准教授。2009 年大阪大学大学院工学研究科教授となり現在に至る。離散事象システムの制御, 診断などの研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会, IEEE の会員。