1

固定ピッチプロペラ型風力発電機の可変速 LPV 制御

学生員 大 坪 和 久* 非会員 本 田 大 作** 正員 梶 原 宏 之***

Variable Rotational Speed Control for Fixed-pitch Type Wind Turbines Using LPV Techniques

by Kazuhisa Ohtsubo, *Student* Daisaku Honda, Hiroyuku Kajiwara, *Member*

Summary

In the paper, we consider the problem of variable rotational speed control for a wind turbine with the pitch fixed from the view point of scheduling by wind speed. For this problem, we apply LPV (Linear Parameter Varying) technique taking the varying parameter as wind speed. Our control purposes are to extract the maximum power from wind energy in the region below the rated wind speed and then to keep the rated power in the region above the rated wind speed. The effectiveness of applying LPV technique is shown through numerical simulations, compared with the results by the conventional control which is proportional to the rotational speed squared.

1.緒 言

近年、クリーンなエネルギーの一つとして風力発電が 世界的に注目されている。中でも、デンマーク、ドイツ などでは、すでに、電力需要の10%以上を風力発電によ り賄っており、EU 諸国全体では 2010 年に向けて電力 需要の22% を供給するように目標を掲げている。欧米 では2010 ~ 2020 年にかけて、電力の5~10% を風 力発電により賄う時代が到来するとも言われている¹⁾。 このような大きな電力需要を目標に掲げることができる ようになった主要因は、風車の大型化、空力性能の向上 と、1990 年代初期から研究開発が盛んに行われた制御技 術の向上にある²⁾。また最近では、風力発電設備の設置 場所が陸上から洋上へとシフトする傾向にある。洋上は 陸上よりも一定風速以上の強い風が期待できるため、安 定した電力供給の実現が可能であり、そのため、わずか な発電効率向上も、長期的には大きな効果が期待できる。 したがって、風力発電の制御技術の研究がますます重要 になってきている。

制御技術の観点から風力発電の効率改善のためには、2 つの問題を解決する必要がある。第1に、定格風速以下 の風速領域において、風エネルギーから最大のパワーを 獲得すること。第2に、定格風速以上の風速領域におい ては、風のエネルギーの流入を調節しながら、定格出力 に維持することである。これらの問題を解決する方法と して、ロータの回転数を風速に応じた最適回転数に制御 する方法がある。風力発電機の最適回転数制御の問題に 関して、R.Datta と V.T.Ranganathan⁵⁾は、従来 から採用されてきた方法について明らかにしている。そ の方法は、風力発電機の負荷トルク T_{dtarget} を

$$T_{\text{dtarget}} = \left\{ \frac{1}{2} \rho \pi r^5 C_{\text{Pmax}} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{opt}}} \right)^3 \right\} \cdot \omega^2 \quad (1)$$

 ^{*} 九州大学大学院工学府
 ** トヨタ自動車株式会社
 ***九州大学大学院工学研究院
 原稿受理 平成16年12月3日

2

とするものである。ここで、 ω はロータの回転速度、 ρ は空気密度、rはロータの半径、 C_{Pmax} は出力係数の最 大値を表し、 λ_{opt} はその時の最適周速比の値を表す。こ の方法は、発電機の回転数の情報のみで必要な発電機ト ルクが決定され、非常に簡便な方法である。しかし、(1) 式は、風力発電機の静的な釣合いの関係式から導かれた ものであるために、風力発電機のダイナミクスが考慮さ れていない。さらに、空気密度は設置場所の気候等に大 きく左右される事を考慮すると、この方法は高い発電効 率を期待することができない。

この問題を解決するため、涌井³⁾ らは PID 制御を 用いて、その制御手法の有用性について明らかにしてい る。しかし、空力トルクが強い非線形性を有するため、 彼らの方法は広い風速領域に適応することは困難である。 そこで、W.E.Leithead⁶⁾ らは、その非線形性に着目 し、スケジューリング制御を適用している。同様にして、 H.D.Battista⁷⁾ らは、ロータ-シャフト-発電機システ ムに対して、Hamiltonian から Controlled Lyapunov 関数を構成して、制御則を導出している。しかし、以上 の文献においては、定格風速以上の風速領域における制 御問題については言及していない。

そこで本論文は、風力発電機の数学モデルが風速変 動に依存する非線形性を有することに着目し、スケジ ューリング制御の一つである LPV(Linear Parameter Varygin,線形パラメータ変動)制御を、最大発電効率を 獲得するための回転数制御、定格出力を維持するための 回転数制御の2つの制御問題に適用し、数値シミュレー ションを通して、その有効性を示すことを目的とする。

本論文の構成は次の通りである。はじめに、本論文で 対象とする固定ピッチプロペラ型風力発電機の概要とそ の運転モードについて述べる。次に、その風力発電機の 数学モデルについて説明し、そのスケジューリング変数 に依存した状態方程式を導出する。次に、制御系設計を 行うために、各運転モードに対しての LPV モデルを導 出し、LPV コントローラを設計する。最後に、性能検 証のために数値シミュレーションを用いて、その有効性 を確認する。

2. 風力発電システムの運動方程式

2.1 風力発電機の運転モードと概要

一般的な風力発電機の運転モードは、Fig.1に示すように分類される¹⁾。以下に、それぞれの運転モードについて述べる。

モード 1.
$$V < V_{ci}$$

風速 V がカットイン風速 V_{ci} 以下の領域である。風車が停止状態から起動する場合には、機械

的な摩擦などの抵抗よりも大きなトルクが必要と なる。しかし、風速 V がカットイン風速 V_{ci} 以 下の場合にはロータが始動トルクを発生すること ができないので、風は吹いているのに回転しない という状況が起こる。したがって、この風速領域 では発電を行うことができない。

 $\mathbf{t} - \mathbf{k} \mathbf{2}, \quad V_{ci} < V < V_{rated}$

風速 V がカットイン風速 V_{ci} から定格風速 V_{rated} までの領域である。この領域では、風からの獲得 エネルギーを最大にするため、風速 V に応じた ロータの回転数に制御することにより、効率的な 発電が行われる。

 $\mp -$ F 3. $V_{rated} < V < V_{co}$

風速 V が定格風速 V_{rated} 以上、カットアウト風速 V_{co} 以下の領域である。定格風速 V_{rated} 以上 の風速領域において、エネルギーを最大効率で獲 得することは可能であるが、定格出力 P_{rated} を 超えるような電力が獲得されたとしても、風力発 電システムの構造的な強度を超えてしまう。よっ て、定格風速 V_{rated} からカットアウト風速 V_{co} までの領域では、ロータの回転数を制御すること により、定格出力 P_{rated} に維持することが必要 になる。

 $\mp -$ F **4.** $V_{co} \leq V$

風速 V が大きくなりカットアウト風速 V_{co} を超 える領域である。この領域では、回転数や発電機 の発生トルクが大きくなり過ぎて、発電システム 全体が危険になるために、強制的に回転を停止さ せる必要がある。



Fig. 1 Operational modes of Wind Lens

本論文では、具体的な風力発電機として、Fig.2に示 す九州大学で開発された風レンズ風車と呼ばれる鍔付き デフューザ型の小型風車を取り上げる。風レンズ風車の 主要目を Table 1に示す。また、本論文では特に、モー 固定ピッチプロペラ型風力発電機の可変速 LPV 制御

ド2とモード3の2つの運転モードにおける、風力発 電機の回転数制御について検討する。

この風レンズ風車の洋上大型風車への展開は、風レン ズ風車の持つデフューザの大型化が、現在の技術では不 可能であるため、まだ考えられてはないが、本論文は、 風レンズ風車のみに焦点を絞った研究ではないために、 以後、述べることは、洋上で扱われるような大型風力発 電機にも適用可能である。



Fig. 2 "Wind Lens" developed by Research Institute of Applied Mechanics in Kyushu University

Table 1	Specifications	of	Wind	Lens
---------	----------------	----	------	------

Rotor diameter	r	600 mm
Blade number	N	3
Rated power	P_{rated}	300 W
Cut-in wind speed	$V_{ m ci}$	1 m/s
Rated wind speed	$V_{\rm rated}$	$11 \mathrm{~m/s}$
Cut-out wind speed	$V_{ m co}$	$22 \mathrm{~m/s}$
Rated rotational speed	$\omega_{ m rated}$	$1580 {\rm \ rpm}$
Rated torque	$T_{\rm rated}$	1.91 N m

2.2 風力発電機の数学モデル

風力発電機のモデルは Fig.3 に示すように、ロータ等 の機械部と直流発電機の電気部から構成される。本論文 では、シャフトや増速機などの伝達系は考えずに直結と し、また軸の捩れやシステム全体の機械的なロス、電気 的なロスはないとする。風力発電機に付加された電流コ ントローラが指令電流に応じて抵抗値を速やかに調節す ることにより、電流が変化を起こし、ロータの回転数を 制御する仕組みになっている。



Fig. 3 Wind turbine system model

Fig.3 に示した風力発電機の運動方程式は、

$$J_T \dot{\omega} = Q_A - K_T i$$

$$L \dot{i} + R \dot{i} + e = K_E \omega$$
(2)

で与えられる。ここで、 J_T は慣性モーメント、L はイ ンダクタンス、R は抵抗、 K_E は逆起電力定数、 K_T は トルク定数を表す。また、 $e \ge i$ はそれぞれ、バッテリ の電圧、電流、 ω はロータの回転数、 Q_A はロータに発 生する空力トルクで

$$Q_A = \frac{1}{2}\rho\pi r^3 C_T(\lambda) V^2 \tag{3}$$

と表される。ここで V は風速、CT はトルク係数で、

$$C_T = \frac{Q_A}{\frac{1}{2}\rho\pi r^3 V^2} \tag{4}$$

と定義される無次元値である。これは、風エネルギーから得られるトルクの割合を表す。同様にして、出力係数 *CP* は、

$$C_P = \frac{Q_A \omega}{\frac{1}{2}\rho \pi r^2 V^3} \tag{5}$$

と表され、風エネルギーから取り出すことのできるパ ワーの割合を表す。出力係数 C_P とトルク係数 C_T の間 には、 $C_P = \lambda C_T$ という関係があり、これらの係数は すべて、周速比

$$\lambda = \frac{r\omega}{V} \tag{6}$$

を変数とした Fig.4のような非線形関数として表される。 ここで、出力係数 C_P の最大値を C_{Pmax} 、その時の周 速比 $\lambda \ge \lambda_{opt}$ とすると、風力発電機は (λ_{opt} , C_{Pmax}) で最大発電可能となる。本論文で対象とする風レンズ風 車は、(λ_{opt} , C_{Pmax}) = (4.51, 1.37) である。

一般に、電気的時定数は機械的時定数よりも小さいので、(2)式の第2式で、i = 0として近似的に

$$J_T \dot{\omega} = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 C_T(\lambda) V^2 - K_T \frac{1}{R} (K_E \omega - e) \quad (7)$$

4

日本船舶海洋工学会論文集 第1号



Fig. 4 Power coefficient C_P and torque coefficient C_T curves of Wind Lens

と表すことが可能である。したがって、抵抗を入力とす る制御問題と考えなければならないが、前述したように、 本研究で対象とする風レンズは電流コントローラをもち、 瞬時に指令電流を実現することが可能であるので、本研 究では、

$$J_T \dot{\omega} = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 C_T(\lambda) V^2 - K_T i \qquad (8)$$

を風力発電機の数学モデルとして取り扱うことにする。

3. 風力発電機の LPV 制御系設計

3.1 数学モデルの線形化

はじめに、(8) 式の非線形方程式を動作点周りで一次 近似することにより線形状態方程式を導出するため、動 作点について確認する。動作点は静的な釣り合い状態で あるので、

$$0 = \frac{1}{2}\rho\pi r^3 C_T(\lambda^*) V^2 - K_T i^*$$
(9)

となる。右肩添字の * は動作点における値を意味する。 よって、動作点における制御入力 *i** は

$$i^* = \frac{1}{2K_T} \rho \pi r^3 C_T(\lambda^*) V^2$$
 (10)

と表される。また、動作点における周速比 λ^* を用いて、 風速 V に応じた回転数 ω^* は (6) 式より、

$$\omega^* = \frac{V}{r} \lambda^* \tag{11}$$

と表される。

次に (8) 式は、風速が一定の場合には $\dot{\omega} = f(\omega, i)$ と いう関係で表されるので、これを (11) 式に示した動作 点周りで Taylor 展開し整理すると、次のような線形状 態方程式を導くことができる。

$$\frac{d}{dt}(\omega - \omega^*) = \frac{\partial f}{\partial \omega} \Big|_* (\omega - \omega^*) + \frac{\partial f}{\partial i} \Big|_* (i - i^*)$$
(12)

ただし、

$$f(\omega, i) = \frac{1}{2J_T} \rho \pi r^3 C_T(\lambda) V^2 - \frac{K_T}{J_T} i$$

であり、

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \omega} \right|_{*} = \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} \right|_{*} = \frac{\rho \pi r^{4}}{2J_{T}} V \frac{dC_{T}}{d\lambda} \Big|_{*}, \quad \left. \frac{\partial f}{\partial i} \right|_{*} = -\frac{K_{T}}{J_{T}}$$

とする。ここで、導出された線形状態方程式 (12) 式 は、 係数が風速 V に依存しているために、風速 V に応じて システムが変動することが分かる。

3.2 モード 2 における LPV 制御系設計 (最大発電効率を得るための回転数制御)

モード 2 における制御目的は、カットイン風速 V_{ci} か ら定格風速 V_{rated} の間の領域において、風エネルギー の獲得を最大にすることである。よって、Fig.5に示す ように、動作点としては風力発電機の出力係数 C_P が最 大となる点を動作点 ($\lambda^* = \lambda_{opt}$)とする。この時、風



速 V に対する最適回転数 ω^* は、周速比の関係より以下のように表現される。

$$\omega^* = \frac{\lambda_{\text{opt}}}{r} V \tag{13}$$

ゆえに、制御目的は次のように表される。

$$\lim_{t \to \infty} \left\{ \omega - \frac{\lambda_{\text{opt}}}{r} V \right\} = 0 \tag{14}$$

モード 2 では、動作点における周速比は常に動作点 $(\lambda^* = \lambda_{opt})$ で一定であるので、(12)式は風速 Vに 線形に依存したモデルであることが分かる。さらに、風 速 Vの変動域がカットイン風速 V_{ci} から定格風速 V_{rated} までの間であることを考慮すると、線形補間タイプのモ ___固定ピッチプロペラ型風力発電機の可変速 LPV 制御

$$\dot{\zeta} = \underbrace{\left(\frac{V_{\text{rated}} - V}{V_{\text{rated}} - V_{\text{ci}}}A_1 + \frac{V - V_{\text{ci}}}{V_{\text{rated}} - V_{\text{ci}}}A_2\right)}_{A_p(V)} \zeta \underbrace{-\frac{K_T}{J_T}}_{B_p} u \tag{15}$$

ただし、

$$A_1 = rac{
ho \pi r^4}{2J_T} V_{
m ci} rac{dC_T}{d\lambda} \Big|_{\lambda_{
m opt}}, \ A_2 = rac{
ho \pi r^4}{2J_T} V_{
m rated} rac{dC_T}{d\lambda} \Big|_{\lambda_{
m opt}}$$

 $\zeta = \omega - \omega^*, \quad u = i - i^*$

本論文では LPV コントローラを設計する際、混合感 度問題をベースとして制御系設計問題を考慮するために、 Fig.6 に示す制御システム構造を用いる。ここで、W_I と W_D はそれぞれ積分重み、微分重み、ω_c は回転数指 令信号、z は制御評価信号、y は観測出力を意味する。 上記の制御システム構造について、拡大系を構成すると 次のようになる。



Fig. 6 Interconection for the mixed sensivity problem

[~]

$$\begin{cases} \dot{x} = A(V)x + B_1\omega_c + B_2u \\ z = C_1(V)x + D_{11}\omega_c + D_{12}u \\ y = C_2x + D_{21}\omega_c + D_{22}u \end{cases}$$
(16)

[~.]

ただし、

$$x = \begin{bmatrix} \varsigma \\ x_I \end{bmatrix}, \ z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$
$$A(V) = \begin{bmatrix} A_p(V) & 0 \\ -W_I & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ W_I \end{bmatrix}$$
$$B_2 = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}, C_1(V) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ W_D A_p(V) & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \ D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ W_D B_p \end{bmatrix}$$
$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \ D_{21} = 0, \ D_{22} = 0$$

上記のモデルに対して、以下に示す制御仕様を満足する 極配置制約付き LPV 出力フィードバックコントローラ を設計する。

- 閉ループ系は内部安定である。
- ω_c から zまでの H_∞ ノルムが γ 以下である。

すべての制御仕様は LMI (線形行列不等式) として実現 されるので、カットイン風速 V_{ci} の時と定格風速 V_{rated} の時のそれぞれ端点での数学モデルに対して LMI を作 成し、すべてを同時に γ を最小化する準最適化問題とし て解くことにより、LPV コントローラを設計する⁸⁾。

3.3 モード 3 における LPV 制御系設計 (定格出力に維持するための最適回転数制御)

モード3における制御目的は、発電機の過負荷を防ぐために、風力発電機の出力 $P = Q_A \omega$ を定格出力 P_{rated} に維持することであるので、獲得する風エネルギーと定格出力の間に、次のような関係

$$P_{\rm rated} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_P(\lambda) V^3 \tag{17}$$

が満足される必要がある。ゆえに、動作点の周速比は出 力係数 *C_P*の逆関数を用いて、次のように求められる。

$$\lambda^* = C_P^{-1} \left(\frac{2P_{\text{rated}}}{\rho \pi r^2 V^3} \right) \tag{18}$$

(18) 式の出力係数の逆関数は、Fig.5 に示すように、最 適周速比 ($\lambda = \lambda_{opt}$) 以外では解を 2 個持つ多価関数で ある。これは、ロータの回転数を上げる、または回転数 を下げて運転することによって、定格出力を維持するこ とが可能であることを意味する。安全性の面から後者の 方法を採用すると、(18) 式は一意に表わされる。(18) 式 を利用し、風速 V に対する最適回転数 ω^* は

$$\omega^* = \frac{V}{r} C_P^{-1} \left(\frac{2P_{\text{rated}}}{\rho \pi r^2 V^3} \right) \tag{19}$$

と表される。ゆえに、制御目的は次のように表される。

$$\lim_{t \to \infty} \left\{ \omega - \frac{V}{r} C_P^{-1} \left(\frac{2P_{\text{rated}}}{\rho \pi r^2 V^3} \right) \right\} = 0 \qquad (20)$$

モード3においてはモード2とは異なり、動作点の周速 比 λ^* は(18)式に従い変動するために、(12)式の係数 $A_p(V)の偏微分項 dC_T/d\lambda$ も風速Vに応じて複雑に 変動する。ゆえに、係数が風速に対してFig.7のように 変動するために、線形補間モデルを導出することができ ない。

そこで本論文では1つの解決策として、Fig.8に示すように、空力特性(トルク係数)曲線を2次関数近似する。

$$C_T(\lambda) = c_2 \lambda^2 + c_1 \lambda + c_0 \tag{21}$$



Fig. 8 Approxmated torque coefficient C_T Curve of Wind Lens

(21) 式を(8) 式に代入して線形化すると、次に示すような風速 V と回転数 ωの 2 つの変数をスケジューリン グパラメータに持つ線形補間モデルが導出される。

$$\dot{x} = A_p(\omega, V)x + B_p u \tag{22}$$

ただし、

$$A_p(\omega, V) = \frac{1}{J_T} \left(\rho \pi r^5 c_2 \omega + \frac{1}{2} \rho \pi r^4 c_1 V \right), B_p = -\frac{K_T}{J_T}$$

モード 3 においては、風速 V と最適回転数 ω^* は (19) 式に従い、Fig.9に示すような関係で表されるので、本 論文では、それを包含するような三角形領域を選択し、 その端点 A_k , (k = 1, 2, 3)を用いて線形補間タイプの LPV モデルを導出する。

$$\dot{x} = A_p(\omega, V)x + \left(-\frac{K_T}{J_T}\right)u \qquad (23)$$

ただし、

$$A_p(\omega, V) = (1 - \alpha)A_1 + \alpha(1 - \beta)A_2 + \alpha\beta A_3$$

$$A_{i} = \frac{1}{J_{T}} \left(\rho \pi r^{5} c_{2} \omega_{i} + \frac{1}{2} \rho \pi r^{4} c_{1} V_{i} \right), \quad (i = 1, 2, 3) ,$$

$$\alpha = \frac{1}{p_{4}} (p_{1} V - p_{2} \omega + p_{3}) ,$$

$$\beta = \frac{(1 - \alpha)\omega_{1} + \alpha \omega_{2} - \omega}{\alpha(\omega_{2} - \omega_{3})} = \frac{(1 - \alpha)V_{1} + \alpha V_{2} - V}{\alpha(V_{2} - V_{3})},$$

$$\begin{cases} p_{1} = \omega_{2} - \omega_{3} \\ p_{2} = V_{2} - V_{3} \end{cases}$$

$$p_3 = -v_1(\omega_2 - \omega_3) + \omega_1(v_2 - v_3)$$

$$p_4 = \omega_2(V_3 - V_1) + \omega_3(V_1 - V_2) + \omega_1(V_2 - V_3)$$

ここで得られた、線形補間タイプの LPV モデルから拡 大系を構成し、 A_k , (k = 1, 2, 3) のぞれぞれ端点での数 学モデルに対して LMI を導出する。そして、モード 2 と同様にして γ を最小化する準最適化問題として解くこ とにより LPV コントローラを設計する。



3.4 数値シミュレーション

本論文では LPV 制御の有効性を検証するために、数 値シミュレーションを行った。風速データとしては、九 州大学応用力学研究所のフィールド試験で計測された 実風速データから、運転モードの風速領域に合致した ものを選択した。モード 2 の制御目的は、風力発電機 を最適周速比 ($\lambda_{opt} = 4.51$) で運転することであるの で、周速比の時系列データの結果を Fig.10に、一方で、 モード 3 の制御目的は、風力発電機の出力を定格出力 ($P_{rated} = 300$) に押さえ込むことであるので、出力の時 系列データの結果を Fig.11に示す。比較のために、(1) 式で示した回転数の 2 乗に比例する制御 (従来制御)⁵⁾ の結果も付記する。

数値シミュレーション結果の定量的な評価のために、 次のような分散評価指標として定義する。 固定ピッチプロペラ型風力発電機の可変速 LPV 制御



Fig. 10 Comparison conventional control with LPV control in mode 2

$$\begin{cases} \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} (x_k - 4.51)^2 \pmod{2} \\ \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} (x_k - 300.00)^2 \pmod{3} \end{cases}$$
(24)

(24) 式の第1式は最適周速比4.51からの、第2式は定格出力300からの分散値を表す。さらに、モード2における制御性能評価のために、次のような評価指標を導入する¹⁾。

$$E_{p}(t) = \frac{\int_{0}^{t} \frac{1}{2} \rho \pi r^{2} C_{P}(\lambda) V^{3} dt}{\int_{0}^{t} \frac{1}{2} \rho \pi r^{2} C_{P\max}(\lambda) V^{3} dt}$$
(25)

これは、時刻 t までに、流体力学的に獲得可能な風の総 エネルギーに対して、どの程度の風エネルギーが実際に 獲得されているかを表す指標である。それらの評価指標 の結果を Table2, 3に示す。

モード 2 の制御においては、Fig.10から、LPV 制御 は従来制御に対して最適周速比近傍での運転を実現して おり、Tabel 2の結果からも、最適周速比からの分散が、 従来制御が 0.439 に対し、LPV 制御は 0.083 と、LPV



Fig. 11 Comparison conventional control with LPV control in mode 3

Table 2	Performance	index	in	mode	2

	σ^2	$E_{P}(300)$
Conventional Control	0.439	0.926
LPV Control	0.083	0.979

Table 3 Performance	index	in	mode	3
-----------------------------	-------	----	------	---

	σ^2
Conventional Control	252.839
LPV Control	65.162

制御は従来制御に対して、約 1/5 の分散値となってい る。さらに、獲得エネルギー $E_P(300)$ の比較で見ても、 従来制御は 0.926 に対し、LPV 制御は 0.979 と約 6 % の改善が見られる。また、モード 3 の制御についても、 Fig.11から、LPV 制御は従来制御と比較して、出力変 動が大きく低減している。Table 3の定格出力 300 から の分散を見ると、従来制御は 252.839 であるのに対し て、LPV 制御は 65.162 と、約 1/4 に分散が抑えられ ている。ここで、Fig.11の (b), (c) には、出力値が 300 からオフセットを残して制御されているように観察され るが、これは、関数近似による数値誤差の影響と考えら <u>日本船舶海洋</u>工学会論文集 第1号

8

れる。

4. 結言

本論文では、固定ピッチプロペラ型風力発電機の発電 効率を改善する一つの方法として、ロータの最適回転数 制御に関する研究を行った。はじめに、数学モデルが風 速変動に強い影響を受けることに着目し、各運転モード に対してスケジューリング制御の一つである LPV 制御 系設計を行った。次に、そのコントローラの性能を検証 するために、数値シミュレーションを行ったところ、い づれの運転モードにおいても LPV 制御は従来制御より も十分な制御性能を確認することができた。今後は、実 験を通してその性能を評価すること、また、本論文で適 用した制御手法を、洋上で扱われるような大型風力発電 機へ適用することが課題である。

参考文献

- 1) 牛山 泉:風車工学入門 –基礎理論から風力発電 技術まで-,森北出版株式会社, 2002.
- 2) 加藤和彦: NEDO における風力発電技術の開発現 状と課題,風力エネルギー利用シンポジウム,2002.
- 3) 涌井徹也,橋詰匠,斉藤久男,長尾利夫:自立電源用 風力発電システムの変速制御運転に関する研究,風 カエネルギー利用シンポジウム,2002.
- 4) 大屋祐二,鳥谷隆,桜井晃,井上雅弘:風レンズ効果 (風エネルギーの集中)による風力発電の高出力化, 風力エネルギー利用シンポジウム,2001.
- 5) R. Datta and V.T. Ranganathan: A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System, *IEEE Trans. Energy Conv.*, no.1, vol.18, 2003, pp 163-168.
- 6) W. E. Leithead, D. J. Leith, F. Hardan and H. Markou: Global Gain-scheduling Control for Variable Speed Wind Turbines, *Proceedings* of European Wind Energy Conference EWEC '99, 1999.
- H. D. Battista, R. J. Mantz and C. F. Christiansen: Energy-based approach to the output feedback control of wind energy systems, *Int. J. Control*, no.3, vol.76, 2003, pp 299-308.
- P. Apkarian, G. Becker, P. Gahinet and H. Kajiwara: LMI Techniques in Control Engineering from Theory to Practice, Workshop Notes CDC,, Kobe, Japan, Dec, 1996.

付 録

ここでは、(23) 式の証明として、2 つのスケジューリ ングパラメータを持つ場合のシステム表現について説明 する。Fig.12に示すような三角形領域を考える。 $V_1(x_1, y_1)$



Fig. 12 Description of the LPV system using two scheduling parameters

線分 $\overline{V_{12}V_{13}}$ 上の点 V(x, y) は、

$$y = \frac{y_{12} - y_{13}}{x_{12} - x_{13}}x + \frac{y_{13}x_{12} - y_{12}x_{13}}{x_{12} - x_{13}}$$
(26)

と表すことが出来る。また、α ≠ 0 と仮定すると、

$$\alpha = \frac{(x_2 - x_3)y - (y_2 - y_3)x - y_1(x_2 - x_3) + x_1(y_2 - y_3)}{x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3)}$$
(27)

となる。さらに、点 V が線分 $\overline{V_{12}V_{13}}$ を β : $(1 - \beta)$ に 内分するものとすると、

$$\begin{cases} x = (1 - \beta)x_{12} + \beta x_{13} \\ y = (1 - \beta)y_{12} + \beta y_{13} \end{cases}$$
(28)

という関係が満足される。ただし、

$$\beta = \begin{cases} \frac{x_{12} - x}{x_{12} - x_{13}} = \frac{(1 - \alpha)x_1 + \alpha x_2 - x}{\alpha(x_2 - x_3)} \\ \frac{y_{12} - y}{y_{12} - y_{13}} = \frac{(1 - \alpha)y_1 + \alpha y_2 - y}{\alpha(y_2 - y_3)} \end{cases}$$
(29)

である。(29) 式を整理すると

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (1 - \alpha) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \alpha (1 - \beta) \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} + \alpha \beta \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix}$$
(30)

となる。仮定を満足しない $\alpha = 0$ の場合について考える と、(30) 式から $[x, y]^T = [x_1, y_1]^T$ となっており、正 しく表現されることが分かる。

ゆえに、2 つのスケジューリングパラメータを持つシ ステムは、1 つの平面内で変動するために、上述したシ ステム表現により、線形補間タイプの LPV システムに 変換することができる。