

シミュレーションによる風力発電用模擬風車の研究 Study of window turbine simulator for wind generation research

北野 達也 権田 欣裕*

Tatsuya KITANO, Yoshihiro GONDA

1. まえがき

我が国は、一次エネルギー総供給の約 82%を海外、約 55%を石油に依存しているが、石油の中長期的な安定供給が懸念されるほか、近年化石燃料の消費に伴い発生する二酸化炭素などに起因する地球環境問題がクローズアップされてきた。風エネルギーは、従来国内ではほとんど利用されていなかったが、近年技術の進歩により経済性と信頼性が高まったことおよび二酸化炭素などの温室ガスの発生がない自然の再生可能エネルギーであるため地球環境対策の観点から極めて有効なエネルギーとして注目されつつある。また、風のエネルギーは蓄えることができないので、つねに風の強く吹く場所を選んで風力発電所を設置する必要がある。風力発電もクリーンな発電システムであり、太陽光発電と同じように、エネルギー密度が低いことや、季節・天候の影響を受けやすく、不安定であるという弱点もある。風力発電を普及させるには、エネルギー変換効率のより高い風車の開発が必要であり、将来的には風のより強い海上に風力発電所を設置することも考えられている。

筆者らの研究は、風力発電システムの風車より効率よくエネルギーを取り出しエネルギーの有効活用する点にある。風力発電システムの研究を行う際、風車は風任せに発電するため、再現性のある検討は難しいため、風車特性を模擬（モデル化）する必要がある。本稿では、パワーエレクトロニクスおよびモータ制御のために開発された回路シミュレータ（PSIM）を用いて、インバータ駆動の誘導モータにより、風車の特性を風速や回転数の関数として風車を模擬する風車模擬装置の検討をシミュレーションにより行ったので報告する。

* 電気工学科 5 年生

2. 風力発電機の特性

図 1 に示す風力発電用風車は一般的な発電用のプロペラ形風車である。ハブはブレードとロータ軸を接続する部分で、ナセルはブレーキ、増速歯車、発電機 G、ピッチ角コントローラ等の機械系と電気系を連系する装置が収納してある。通常、増速歯車とロータ軸の間にはブレーキがあり、強風が吹くとブレードの保護の為風車の回転を止める役割をする。本稿では、回路シミュレータ上で模擬風車を検討するため、風エネルギーをブレードで受けロータ軸によって機械的動力に変換される風車と考え、ブレーキの効率を無視した。表 1 にモデル化する風車の性能表を示す。通常、ピッチ角を制御することで風エネルギーを有効に機械

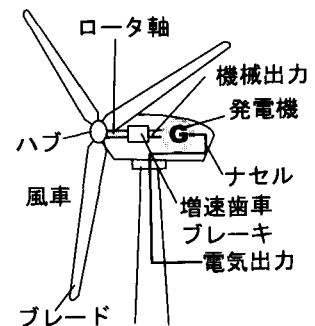


図 1 プロペラ型風車

表 1 モデル風車性能 (F2.5-4000)

ローター半径	2.5m
ピッチ角	10°
ギア比	1:5
動作風速帯	3.5~15m/s
定格風速	14m/s
最大風速	20m/s
出力電力	4000w
タワー高さ	7m

出力に変えることができる⁽³⁾が、本モデルはピッチ角を 10° としてモデル化を行った。

表1のモデル風車は、風速 3.5m/s 以下(カットイン風速 3.5m/s)では発電、 15m/s 以上でブレーキがかかり回転しないように風車を保護するように設計されている。図2に本モデル風車を実際の風洞で風速を 4m/s から 2m/s ごとに 14m/s まで変化させたときのモデル風車の回転数-機械出力特性(実測値)を示す。風速が強ければ、機械出力が増加するため、発電電力が増加することがわかる。図2のモデル風車の機械出力特性を模擬するためには図3のようなインバータ駆動される誘導機の機械出力(軸出力)を図2の特性になるように制御することで、風車を模擬することができる。

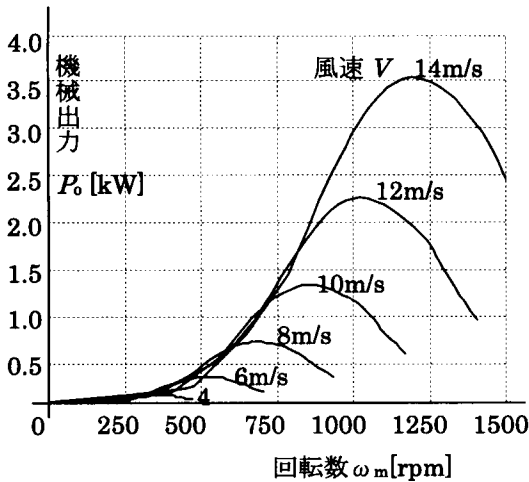


図2 モデル風車の回転数-機械出力特性

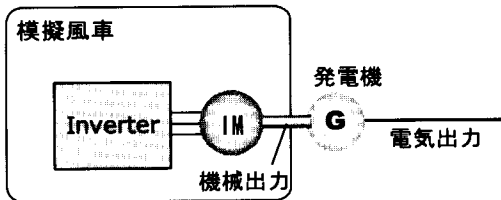


図3 模擬風車のイメージ

3. 風力発電機モデリングと構築

風は空気の流れであり、風の持つエネルギーは運動エネルギーである。質量 m 、速度 V の物質の運動エネルギーは $(1/2) \cdot mV^2$ で表せるので、風を受ける翼の面積 $A[\text{m}^2]$ 風車を考えると、この面

積を単位面積あたりに通過する風速 $V[\text{m/s}]$ の風のエネルギー $P_m[\text{W}]$ は、その風の空気密度を $\rho[\text{kg/m}^3]$ とすると風の持つエネルギー次式で表される。

$$P_m = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad (1)$$

上式より、風車を得るエネルギーは、受風面積に比例し、風速の3乗に比例するため、風エネルギーを利用する場合少しでも風の強いところを選ぶことが重要である。風車翼で受けた運動(風力)エネルギーを、機械(回転)エネルギーに変え、発電機を回し電気を起こすが、この翼の変換効率を C_p 、増速機効率 η_m 、発電機効率 η_g 、方位制御ロス η_o とすると風力発電による出力 $P_o[\text{W}]$ は次式で表される。

$$P_o = \frac{1}{2}\rho AV^3 C_p \eta_m \eta_g \eta_o \quad (2)$$

本稿でのモデルは、増速機効率 η_m 、発電機効率 η_g 、方位制御ロス η_o はすべて無視できると考え式(2)は次式のようになる。

$$P_o = \frac{1}{2}\rho AV^3 C_p \quad (3)$$

式(1)(3)より翼の変換効率 C_p は、

$$C_p = \frac{P_o}{P_m} \quad (4)$$

となる。

一般に、翼の変換効率 C_p は風車の物理パラメータから一様に決まる。

ここで、周速比 λ (Tip Speed Ratio:TSR)を定義する。周速比 λ はブレードを設計するための重要な要素であり、次式で定義される。

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{V} \quad (5)$$

λ :周速比、 ω_r :ロータ軸角速度 $[\text{rad/s}]$

V :風速、 R :風車半径

一般に、低回転の複数枚のブレードは、およそ翼端速度比が $1 \sim 4$ で、高回転で使うものは $5 \sim 7$ 程度である。

模擬装置の使用する風車の翼の変換効率を求め
る。風車の半径 $R = 2.5[m]$ 、風を受ける翼の面積
 $A = 19.625[m^2]$ 、 $\rho = 1.2[kg/m^3]$ とし、式(1)に
各風速を入れ、風の持つエネルギー P_m を算出し、
図2のグラフからその風車の機械出力 P_o を読み取
り各風速に対して式(4)および式(5)より算出した
結果をプロットすると図4のようになる。図4か
らわかるようにのように翼の変換効率 C_p は、風速
にかかわらずほぼ1本の線になることがわかる
(ほぼ1本の線のため風速 4m/s、10m/s、14m/sの
み表示)。翼の変換効率 C_p は非線形カーブである
ため次式の多項式で近似的に求めることにする。

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \lambda^i \quad (6)$$

a_0, a_1, \dots, a_n : 多項式係数

式(6)の多項式の係数 a_0, a_1, \dots, a_n の求め方は、
図4でのカーブ上で、代表的なポイント n 点、
 (λ_i, C_{p_i}) 、 $i = 0, 1, \dots, n$ を選定し、フィットアル
ゴリズム (least-squares) を用いれば、式(6)の多項
式係数が得られる。使用する風車のトルク係数 C_p
が図4のように与えられた時、式(6)において3、
5、6、7次の多項式としてフィットアルゴリズム
を適応した結果を図5に示す。図5の実線は復元
する C_p を示す。図5のカーブを見ると、多項式係
数の次数が上がれば、元の C_p を限りなく小さな誤
差で再現できるが、次数が上がれば演算等が複雑
になるため、本研究では、6次多項式のフィット
アルゴリズムで計算を行なうことに決定した。表
2に6次多項式のフィットアルゴリズムの多項式
係数を示す。

表2 模擬システムの多項式係数

パラメータ	値
a_0	$-8.04641869463 \times 10^{-1}$
a_1	1.54019028952459
a_2	-1.16687650219155
a_3	$4.44361595956 \times 10^{-1}$
a_4	$-8.79113811040 \times 10^{-2}$
a_5	$8.6467965664 \times 10^{-3}$
a_6	$-3.3574804136 \times 10^{-4}$

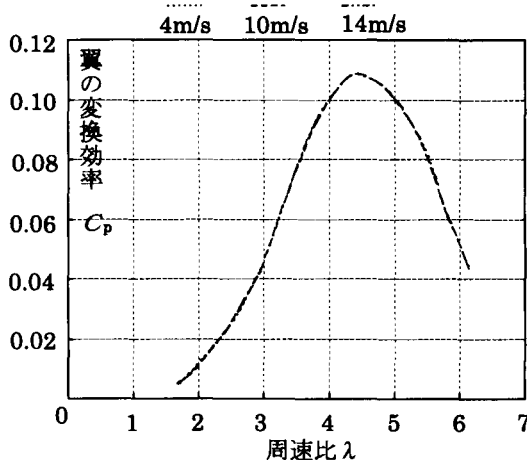


図4 風車の翼の変換効率

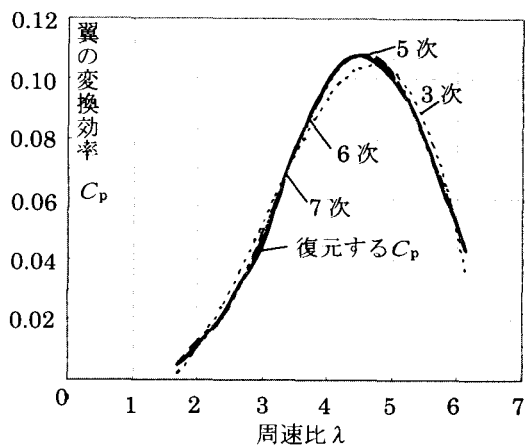


図5 多項式フィット結果

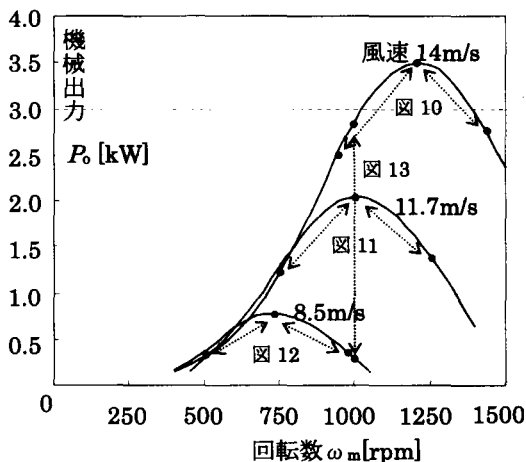


図6 (3)式による演算結果

表2の係数を使用して式(6)に代入し C_p を演算し式(3)から出力電力を求めると、図6のように、測定していない風速 (11.7m/s、8.5m/s) においても回転数に対する風車の機械出力特性を演算により求めることができる。

回路シミュレータ上では誘導機に、機械出力指令 Pref を与えることにより、実際の風車と同じ特性を模擬することができる。風車の機械出力特性を模擬するには、インバータ駆動の誘導機を使用する。図7のように 誘導機の機械出力指令値 P_{ref} は、風速 V と回転数 ω_m により式(3)と(6)から算出できる。図6の機械出力特性を得るためには、図8のような制御ブロック図で実現する。

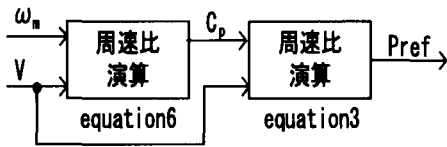


図7 風車の模擬方法

ここで、インバータの出力電流制御にはベクトル制御を適応する⁽²⁾。所望する風速 V を与えて、その風速 V と回転数 ω_m により、機械出力指令値 P_{ref} を計算する。実際の機械出力 P がその指令値に追従するように、トルク電流 i_{dref} を制御する。なお励磁電流 i_{dref} は一定値に制御される。

4. 模擬風車の評価

模擬風車が回路シミュレータ PSIM 上で、実現されていることを確認するために、図9のように模擬風車の機械出力の軸上に定回転数となる負荷を設けて、軸の回転数を調節した。

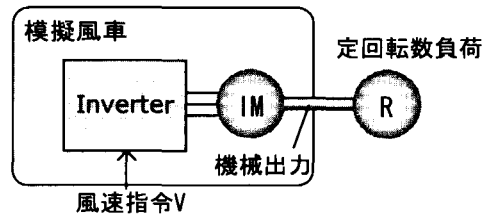


図9 模擬風車の評価回路

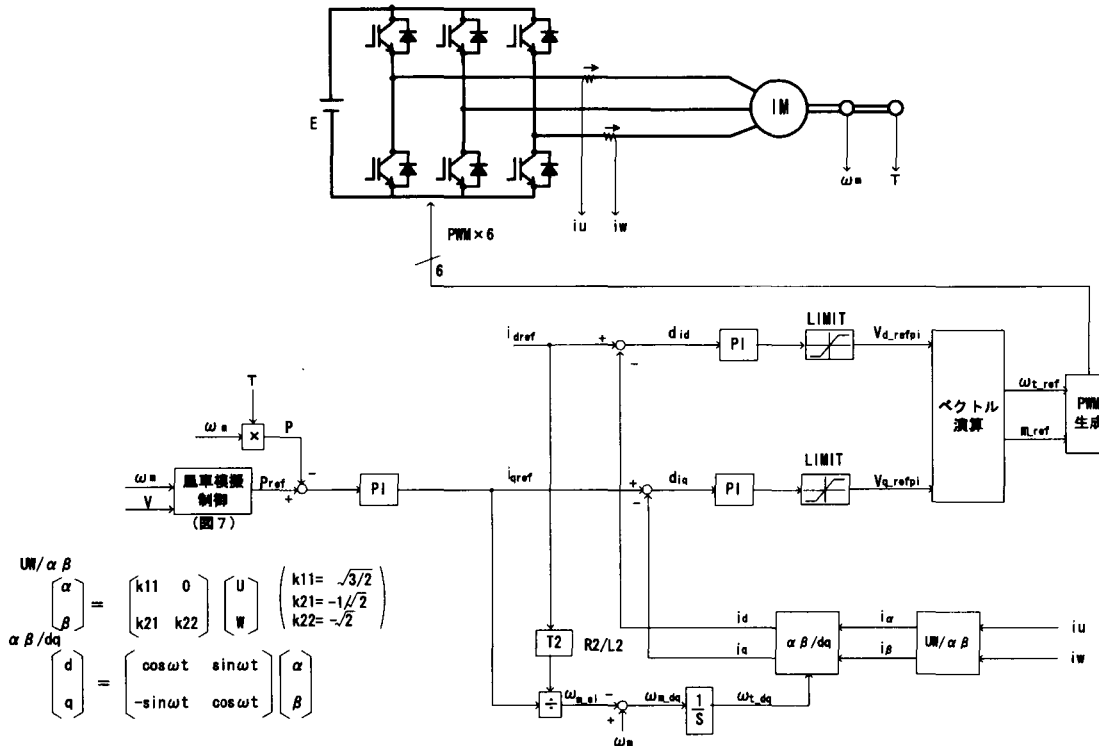


図8 誘導機の電流制御

シミュレーションによる風力発電用模擬風車の研究

風速指令を 14m/s 一定のもと、回転数 ω_m を 950 → 1200 → 1410 → 1200 → 950 rpm と変化させたときのシミュレーション波形を図 10 に示す。回転数 950 rpm の時に機械出力が 2.54kW で 1200 rpm のときに機械出力が 3.49kW、1410rpm の時に 2.91kW となっている。この結果は図 6 の風速 14m/s の時の回転数-機械出力特性の軌跡を移動していることを示しており、回路シミュレータ PSIM で風速 14m/s 時において、風車が模擬できていることがわかる。同様に、風速 11.7m/s 一定のもと、回転数を 750 → 1000 → 1250 → 1000 → 750 rpm と変化させたときのシミュレーション波形を図 11 に示し、風速 8.5m/s 一定のもと、回転数を 500 → 740 → 950 → 740 → 500 rpm と変化させたときのシミュレーション波形を図 12 に示す。風速 11.7 m/s、風速 8.5m/s ともに図 6 の特性を捕らえていることがわかる。

更に、回転数を 1000 rpm 一定のもとで、風速指令値を 14 → 11.7 → 8.5 → 11.7 → 14m/s と変化させたときのシミュレーション結果を図 13 に示す。同様に風速の変化に対しても、図 6 の特性を捕らえているため、風力発電模擬装置として利用できることがわかる。

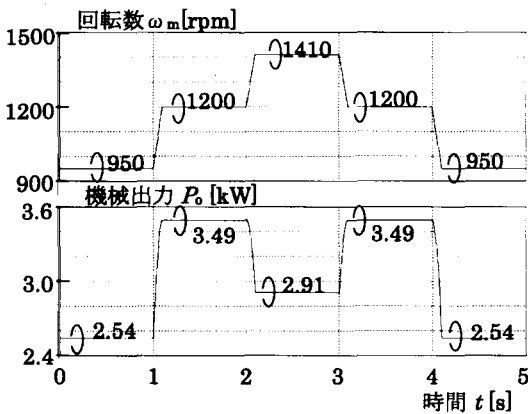


図10 シミュレーション結果(風速14m/s)

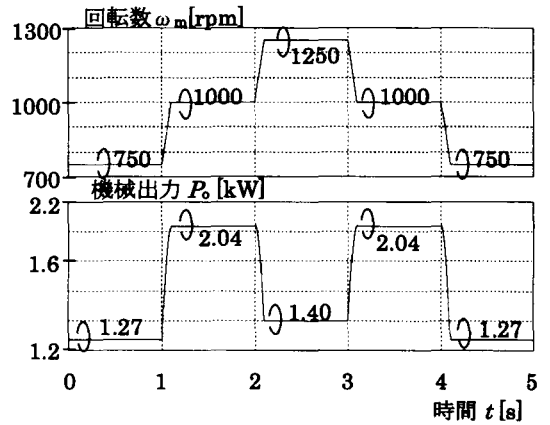


図11 シミュレーション結果(風速11.7m/s)

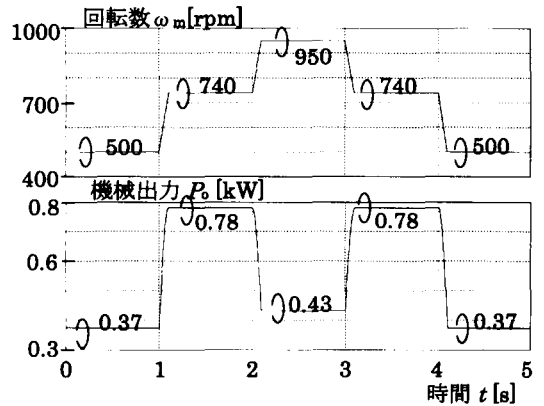


図12 シミュレーション結果(風速8.5m/s)

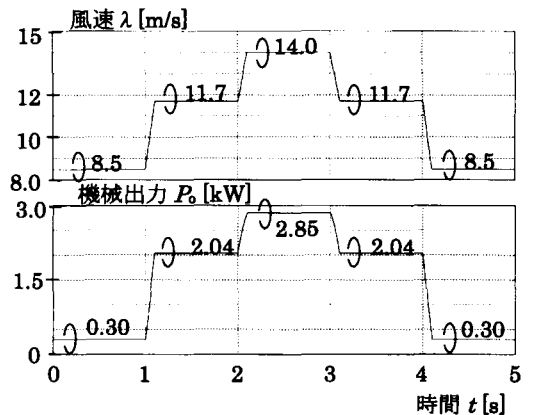


図13 シミュレーション結果(1000rpm一定)

5. あとがき

本稿では、6次の多項式を用いて、風車の機械出力特性を模擬できることを示した。そして、この機械出力特性はインバータ駆動された誘導機を用いることにより、模擬することができた。さらに、本風車模擬装置を使ったシステムにより、良好なシミュレーション結果が得られたため、本模擬風車は風力発電システムを検討する風車模擬装置として利用できることを実証した。今後、この風車模擬装置を利用し、風力発電システムにおける最大電力点追尾制御を検討していく予定である。

参考文献

- (1) Nichita, Cristian: Diop Amadou etc :
'Control structures analysis for a real time wind system simulator ,'
Wind Engineering, V22, N6, 276-286 (1998)
- (2) B.K. Bose: 'Power electronics and variable frequency drives technology and applications,' IEEE (1997)
- (3) 松坂 知行他: 「風力発電機の出力変動安定化制御に関する研究」、電学論 B、117巻、5号、平成9年、pp.625-633
- (4) 千葉浩克: 「竜飛ウインドパークにみる風力発電の実態」: パワーエレクトロニクス研究会 (2001)
- (5) 七原俊也: 「海外における風力発電の導入状況と電力システムへの影響」、電学論 B、120巻、3号、平成12年、pp.321-327
- (6) 鈴木和夫他: 「可変速風力発電システム」、電学誌、121巻、7号、pp.450-453 (2001)
- (7) 伊藤和人他: 「小型風力発電システムにおける最大電力追従制御時の動特性改善法」平成13年電気学会産業応用部門大会 vol.1, pp.621-624
- (8) 牛山泉: 「風車工学入門」森北出版株式会社 (2002)

「受理年月日 2003年9月30日」