

# 風力発電機の総合効率算定法に関する検討

学 生 員 井 上 彬\* 正 員 高 橋 理 音\*  
 正 員 村 田 年 昭\* 正 員 田 村 淳 二\*  
 正 員 木 村 守\*\* 正 員 二 見 基 生\*\*  
 上級会員 井 出 一 正\*\*

## A Calculation Method of the Total Efficiency of Wind Generators

Akira Inoue\*, Student Member, Rion Takahashi\*, Member, Toshiaki Murata\*, Member, Junji Tamura\*, Member, Mamoru Kimura\*\*, Member, Moto-o Futami\*\*, Member, Kazumasa Ide\*\*, Senior Member

The spread of wind energy converter is progressing in recent years and its capacity is becoming larger and larger. In order to capture more energy from the wind, it is important to analyze loss characteristics of wind generators for operating speed which is determined dependent on the wind speed. This paper presents a method to evaluate various losses in wind generator as a function of wind speed, which is based on the steady state analysis and thus the calculation can be performed quickly. By using the proposed method, wind turbine power, generator output, various losses, and the total energy efficiency are calculated for three types of wind speed data which are represented by a weibull function.

キーワード：風力発電機，誘導発電機，電力損失，効率，設備利用率

**Keywords:** wind generator, induction generator, power loss, efficiency, capacity factor

### 1. まえがき

近年風力発電は世界的に追い風を受け、急速に設置台数を増やしている。地球温暖化対策の有効性や、大型化や量産化による発電コスト低下が大きく影響しているためと考えられ、今後も発電設備の大容量化は進むと思われる。しかし風力発電で得られる電力は安定しているとは言えず、発生電力や損失は風速に依存して常に変化する。また、風力発電機における出力や損失などの状態量には多くの非線形要素が含まれることから、平均風速などで発電量を予測すると誤差を多く含んでしまう。特に、山岳部が多く地形の複雑な我が国においてはより複雑な状態量の変化が予想され、状態量予測のための解析手法を検討することが今後の風力発電機の経済的運用計画だけでなく、性能向上および普及のために重要であると考えられる。

筆者らは誘導発電機を用いた風力発電機を想定し、風車特性式と発電機等価回路を基礎として、定常運転時の各種状

態量、すなわち風車出力、発電機出力並びに各種損失等を算定する手法に関して検討を進めている。本論文では、風速を入力とした時の風車並びに発電機の各種状態量の特性に関する解析結果を示す。本手法は誘導発電機の定常状態等価回路を基礎としているが、変動の大きい自然風を対象とした場合には、発電機の電気系時定数と風速変化の時定数が近くなり、電氣的過渡現象の影響が無視できなくなる可能性がある。そこで、汎用電力系統解析ソフトPSCAD/EMTDC<sup>(1)</sup>を用いて過渡現象を含んだ解析を行い、提案手法による結果との比較を行ったが、結果として両者の差は非常に小さいことが確認された。

提案手法の応用例として、近年公開されたNEDOの局所風況マップ<sup>(2)</sup>(Local Area Wind Energy Prediction System)のデータを基礎として確率分布密度関数(ワイブル関数)で表現された風況データを入力として用い、風力発電機の設備利用率や年間総合効率を算定した。風力発電においては、一般に風速変動に対応して発電機の出力変動が大きい。そのために限られた入力(風の持つ運動エネルギー)からより多くの出力を得るための尺度として、瞬間の効率ではなく風況データと発電エネルギーにより求まる総合効率、設備利用率が重要となる。これらは採算性や風力発電機の種類決定等に対して重要な意味をもつことになる。国土の狭い日本においては風況に恵まれた地域は多くないため、総合効率算定法の検討は今後の風力発電の導入促進のために

\* 北見工業大学 工学部 電気電子工学科  
〒090-8507 北見市公園町 165 番地  
Kitami Institute of Technology

165, Koen-cho, Kitami 090-8507

\*\* (株)日立製作所 日立研究所

〒319-1292 日立市大みか町七丁目 1 番 1 号

Hitachi, Ltd.

1-1, Omika-cho, 7-chome, Hitachi 319-1292

重要であると考えられる。

## 2. 状態量算定手法の構築<sup>(3)</sup>

**2・1 提案手法の概要** 風力発電機には一般に誘導機や同期機が使用され、小型・軽量・低コスト・メンテナンスの容易性、そして系統に直接接続できるという点から誘導機が多く使用されている。このことから本論文においては誘導発電機を対象として検討を行うこととし、構造が簡素なかご型誘導機を想定した。一般的な定常状態等価回路を用いて状態量を正確に計算する手法を以下に提案する。すなわち過渡現象を無視して状態量を算定する試みであるがその過程において次に示すような解決すべき課題があることが明らかとなった。

- ① 誘導機の状態量は回転数、すなわちすべりが定めれば容易に求められる。しかし、すべりは入力トルクに依存しており、入力トルクからすべりを得ることは容易でない。
- ② 風力発電機で発生する機械損により発電機を得る正味の入力はその分だけ減少し、その時点ですべりが決定される。しかし機械損が回転数（すべり）の関数になるため、機械損とすべりを同時に求めることが容易でない。
- ③ 漂遊負荷損や鉄損は測定しにくい損失であり、定量的な扱いが難しい。

本論文ではこれらを考慮しつつ、正確に状態量を算定する手法を提案する。

**2・2 風力発電機におけるエネルギーの流れ** 風の持つエネルギーは一般に以下の式で与えられる。

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \cdots \cdots (1)$$

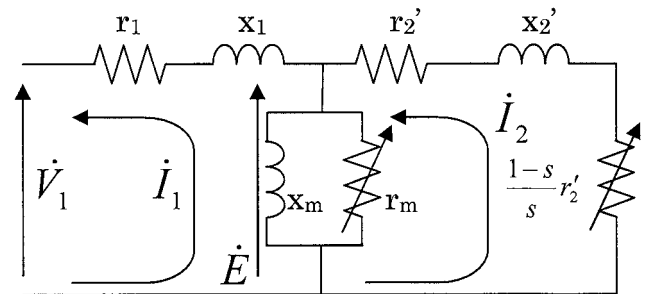
( $A$ : 受風面積 [ $\text{m}^2$ ]  $\rho$ : 空気密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $V_w$ : 風速 [ $\text{m}/\text{s}$ ])

風力発電機では、この式で表される風の運動エネルギーを風車で回転トルクへ変換し、その後発電機において電気エネルギーに変換する。本論文の効率算定法は風車の発生機械トルクを基準とし、発電機の効率を解析することを基本とした。なお、風力発電機は発電過程でいくつかの損失を生じ、エネルギーの一部を熱として失うこととなるが、それらを正確に解析することが効率算定において重要である。誘導発電機におけるこれら損失は表 1 のように分類される。これらの損失を図 1 で示された等価回路の計算や解析式を用いることで表現している。また、誘導発電機による風力発電の場合には、発電機のシャフトにパワーを伝達する前に増速ギアが存在するが、本論文では損失のない理想ギアを想定した。図 1 の回路構成により (2) 式に示すような電圧方程式が成り立つので、これより等価回路上での電氣的損失（1 次銅損、2 次銅損等）を求めることができる。

表 1 誘導機の損失分類

Table 1. Losses of induction machine.

Mechanical loss	Brush friction loss (winding type)
	Windage loss
	Ball bearing loss
Copper loss	Primary winding copper loss
	Secondary winding copper loss
Iron loss	
Stray load loss	



$r_1$ =stator resistance,  $r_2'$ =rotor resistance,  
 $x_1$ =stator leakage reactance,  $x_2'$ =rotor leakage reactance,  $r_m$ =iron loss resistance,  
 $x_m$ =magnetizing reactance,  $s$ (slip)= $(N_s \cdot N)/N_s$ ,  
 $N$ =rotor speed,  $N_s$ =synchronous speed.

図 1 誘導機の等価回路

Fig. 1. Equivalent circuit of induction generator.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= - \left( r_1 + jx_1 + \frac{j r_m x_m}{r_m + jx_m} \right) \dot{I}_1 + \frac{j r_m x_m}{r_m + jx_m} \dot{I}_2 \\ 0 &= - \frac{j r_m x_m}{r_m + jx_m} \dot{I}_1 + \left( \frac{j r_m x_m}{r_m + jx_m} + \frac{r_2'}{s} + jx_2' \right) \dot{I}_2 \end{aligned} \cdots \cdots (2)$$

## 2・3 提案手法で使用する解析式

(1) 風車パワー 本論文では風車モデルとして米国で開発された MOD-2 モデル<sup>(4)</sup>を用いた。(3) 式の風車出力においてパワー係数  $C_p$  は (5), (6) 式で表され、図 2 に示すように周速比に対し非線形性を示し、実際の風車に近い特性を得ることができる。

$$P_{wtb} = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda) \pi R^2 V_w^3 [\text{W}] \cdots \cdots (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{wtb} R}{V_w} \cdots \cdots (4)$$

$$C_p(\lambda) = 0.5(\Gamma - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\Gamma} \cdots \cdots (5)$$

$$\Gamma = \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{3600}{1609} \cdots \cdots (6)$$

( $\lambda$ : 周速比  $R$ : 風車半径 [ $\text{m}$ ]  $\omega_{wtb}$ : 風車角速度 [ $\text{rad}/\text{s}$ ]  $\beta$ : ブレードピッチ角 [ $\text{deg}$ ])

本論文では (3) 式を定格容量で割ることにより pu 表現に変換する。pu 化することにより今後調査の対象としたい任

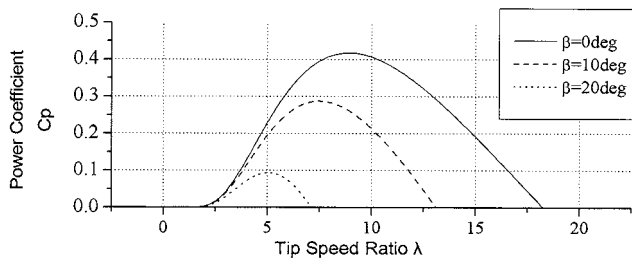


図2 パワー係数

Fig. 2. Power coefficient.

意の風車容量を乗ずることにより，比例関係によりその風車特性を模擬的に表現することができる。

(2) 発電機入力 発電機入力は等価回路上では回転子回路上の可変抵抗での消費電力として表されるが，発電機動作ではすべりが負となるため，入力電力となる。

$$I_2^2 \left( \frac{1-s}{s} \times r_2' \right) [W] \dots\dots\dots (7)$$

本手法では，実際に発電機に入るパワー（風車出力から損失を差し引いた値）と(7)式で求まる等価回路上のパワーが一致するすべりを計算し，風車パワーを電気回路上の素子と電流で扱えるようにした。

(3) 銅損 1次・2次コイルの抵抗損であり，次式により得られる値を3倍した値が3相分の発電機銅損となる。

$$W_{copper} = r_1 \times I_1^2 + r_2' \times I_2^2 [W] \dots\dots\dots (8)$$

(4) 鉄損 一般に，誘導機の鉄損は等価回路内の鉄損抵抗でのオーム損として扱われる。しかし，実際の鉄損は鉄心内の磁束が時間的に変化することにより発生する損失であるため，等価回路上の一定抵抗を用いた表現では正確な算定はできないと考えられる。一般に，鉄損は周波数と磁束密度の2乗に比例するうず電流損と周波数に比例し磁束密度の1.6～2乗に比例するヒステリシス損の和で表され，更に回転機の場合には継鉄部分と歯の部分で磁束密度が大きく異なるので，別々に考慮する必要がある。そこで，本手法ではまず磁束密度を求め，次に設計計算で用いられる(9)式より重量あたりの鉄損を計算する<sup>(5)(6)</sup>。次に，銅損等との整合性を取るために，得られた鉄損と同じ損失を等価回路上で与える鉄損抵抗値を収束計算により求める。

$$w_f = B^2 \left\{ \sigma_H \left( \frac{f}{100} \right) + \sigma_E d^2 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right\} [W/kg] \dots\dots\dots (9)$$

以下に本手法における鉄損の解析式と磁束密度の求め方を記す。(9)式は鉄心1kgあたりの鉄損を表しており，これに鉄心重量を乗じて発電機全体の鉄損を求める。 $B$ ,  $\sigma_H$ ,  $\sigma_E$  はそれぞれ継鉄または歯の部分における磁束密度[T]，ヒステリシス損係数，うず電流損係数である。また  $f$  は周波数[Hz]， $d$  は鋼板の厚さ[mm]である。磁束と内部起電力の関係は一般に(10)式のように与えられる。これより内

部起電力は磁束に比例するので，コイルの巻き数が一定であることから結果的に磁束密度に比例する。この関係を用いて，等価回路から得られる誘導起電力より磁束密度を求め，(9)式に適用して鉄損を計算する。すなわち，発電機が定格出力のときの磁束密度を設定してこれを基準値  $B_0$ （歯及び継鉄部各々設定）とし，(11)式のように誘導起電力  $E$  の変化に比例して磁束密度  $B$  が決定されるようにする。

$$E = 4.44 \times f \times k_w \times w \times \phi [V] \dots\dots\dots (10)$$

( $k_w$ :巻線係数  $w$ :コイルの巻数  $\phi$ :磁束)

$$B = B_0 \times \frac{E}{E_0} [T] \dots\dots\dots (11)$$

( $E_0$ :発電機定格出力時の内部起電力)

次に，(9)式にそれぞれ継鉄と歯の部分の重量を乗算し，両者の和をとり全鉄損  $W_f$  を求める。続いて，その値と等価回路上の鉄損抵抗  $r_m$  で生ずる損失  $W_r$  を一致させるために(12)式を用いて  $r_m$  を修正する。なお，計算開始時の  $r_m$  は磁束密度が  $B_0$  の時の値を初期値として収束を開始している。

$$r_m = \frac{E^2}{W_f/3} \dots\dots\dots (12)$$

この手順を繰り返すことにより，磁束密度から求まる鉄損  $W_f$  と等価回路上の鉄損抵抗での抵抗損が一致する  $r_m$  を収束計算により決定する。

なお，図1の等価回路においては，厳密には磁束レベルに応じて励磁リアクタンス  $x_m$  も変化し，その影響を後述する計算フローチャート（図5）で考慮することは容易である。しかしながら，標準的な飽和特性を用いて実際に計算を行ったところ，後に示す総合効率に関する数値計算例（表5）においてその影響は非常に小さいことが明らかとなったので，ここでは  $x_m$  の変化は無視する。

(5) 軸受摩擦損 軸受摩擦損は発電機の軸が回転することにより起こる機械的な摩擦損であり，一般的に(13)式で表される。 $K_B$  は，軸受けにかかる重量，軸の直径，軸の周速度によって決まるパラメータであり<sup>(5)</sup>， $\omega_m$  は軸の回転角速度である。

$$W_b = K_B \omega_m [W] \dots\dots\dots (13)$$

(6) 風損 一般に風損の正確な計算は非常に困難であるため，本検討では(14)式に示すような近似式<sup>(6)</sup>を用いる。 $K_W$  は，回転子の外形，長さ，表面の周速度によって決まるパラメータである。

$$W_m = K_W \omega_m^2 [W] \dots\dots\dots (14)$$

(7) 漂遊負荷損 電気機器には，設計にあたって簡単な計算では算定できない損失がある。これが漂遊負荷損であり，漏れ磁束による導体および近接した金属部分に生じるうず電流損やギャップにおける磁束分布ひずみにより

生ずる鉄損などがあげられる。本検討では、一般的な表現として用いられている (15) 式を適用する<sup>(5)</sup>。

$$W_s = 0.005 \frac{P^2}{P_n} [\text{W}] \dots \dots \dots (15)$$

( $P$ : 発電電力 [W]  $P_n$ : 定格出力 [W])

**2・4 算定法全体の流れ** (2) 式で表される発電機定常状態方程式および (7) ~ (15) 式で表される損失分を用いて、発電機状態量を決定する手順を示す。風車出力(風車トルク [N・m] × 風車回転角速度 [rad/s]) が発電機に加えられたときのすべりが得られると等価回路上の各電流を求めることができ、これに従い発生電力や損失を決定できる。このように、誘導機ではすべりに対応して各状態量を容易に求めることができるが、その逆を行う場合には複雑な計算が必要となる。そこで、あらかじめ用意したすべり・トルク特性を用いて風車トルクと等しい発電機電磁トルクを発生させるすべりを探索法により決定することとした。図 3 は発電機発生トルク(反抗トルク)をプラスとして描いており、後に示す解析例において使用した誘導機定数に対応したすべり・トルク特性である。

風車の発生出力は (3) 式から得られるが、風車が発電機とギアを介して接続されているためにすべりの関数となる。そこで本手法では、同期速度(すべり 0)を初期値として、風車出力と発電機等価回路上での入力とがバランスする回転数(すべり)を探索法により収束計算する。この際、機械損(軸受摩擦損+風損)と漂遊負荷損は発電機等価回路上で表現できないため、本手法では発電機入力以前に生じ

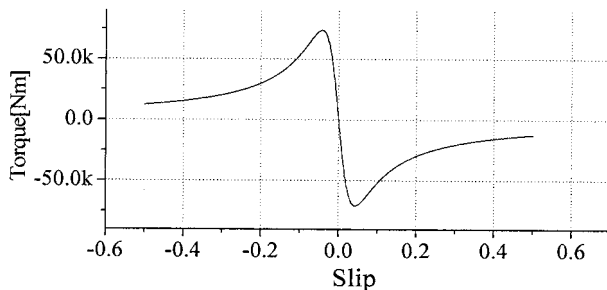


図 3 すべりトルクカーブ

Fig. 3. Slip-Torque curve.

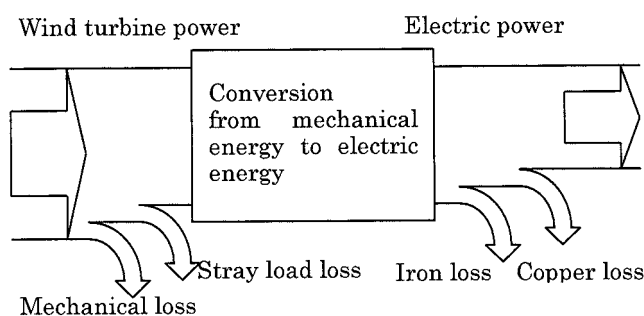


図 4 本手法におけるパワーの流れの考え方

Fig. 4. Expression of power flow in the proposed method.

る損失として取り扱い、(13) ~ (15) 式から得られる損失分を風車発生出力から差し引いたものを発電機に印加する形で計算を行う。ここで各機械損は発電機回転角速度(すべり)の関数となっており、また漂遊負荷損も出力の 2 乗に比例するため、結果的にすべりの関数となるので、すべりの探索過程でこれら全ての成分がバランスするように収束計算を行う必要がある。以上で示した損失を図 4 のパワー流れ図に示す。

**2・5 フローチャート** 図 5 に提案手法のフローチャートを記載し、詳細な手順を以下に述べる。

- ① 入力値は風速であり、この風速からすべての状態量を算定することが目的となる。
- ② 風車発生出力を (3) 式より計算する。なお計算開始時における角速度の初期値は同期角速度とする。
- ③ ②で計算した風車出力から機械損である軸受摩擦損と風損を差し引き、更に漂遊負荷損を差し引く。なお、計算 1 回目ではこれら損失分は 0 とする。

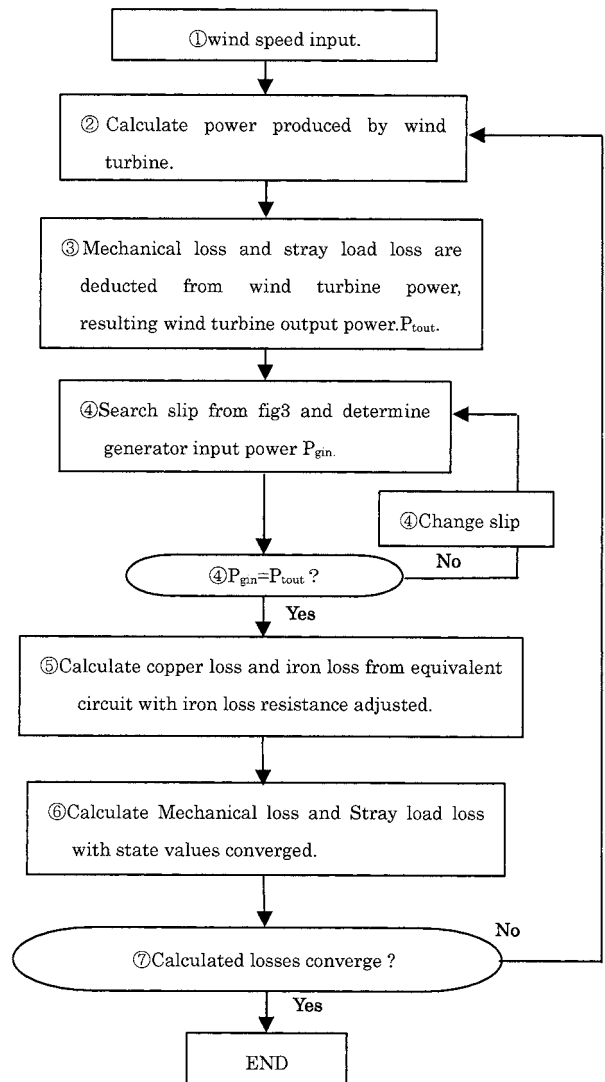


図 5 フローチャート

Fig. 5. Flow chart.

- ④ すべりを図3の特性に従い探索する。すなわち③で求めたパワーと等しい発電機入力になるときのすべりを求める。
- ⑤ ④で決定されたすべりを用いて(2)式より等価回路上の電流を求め、発電出力、銅損、鉄損などの状態量を計算する。ここで、前述した鉄損算定方法を用いて磁束密度から損失  $W_f$  を計算し、さらにこれと同じ損失を発生させるような等価回路上の鉄損抵抗  $r_m$  を求める。
- ⑥ ⑤で求められた発電機状態量を使い軸受摩擦損と風損を(13)、(14)式より計算する。さらに漂遊負荷損を(15)式から計算する。
- ⑦ これらの全損失が収束したなら次へ進み、そうでないならば②へ戻る。

表2 発電機定数

Table 2. Generator parameters.

rated power	5[MVA]	rated voltage	6600[V]
rated frequency	60[Hz]	pole number	6
stator resistance	0.0051[pu]	stator leakage reactance	0.088[pu]
rotor resistance	0.0091[pu]	rotor leakage reactance	0.125[pu]
iron resistance	1377.4 [pu]	magnetizing reactance	4.776[pu]

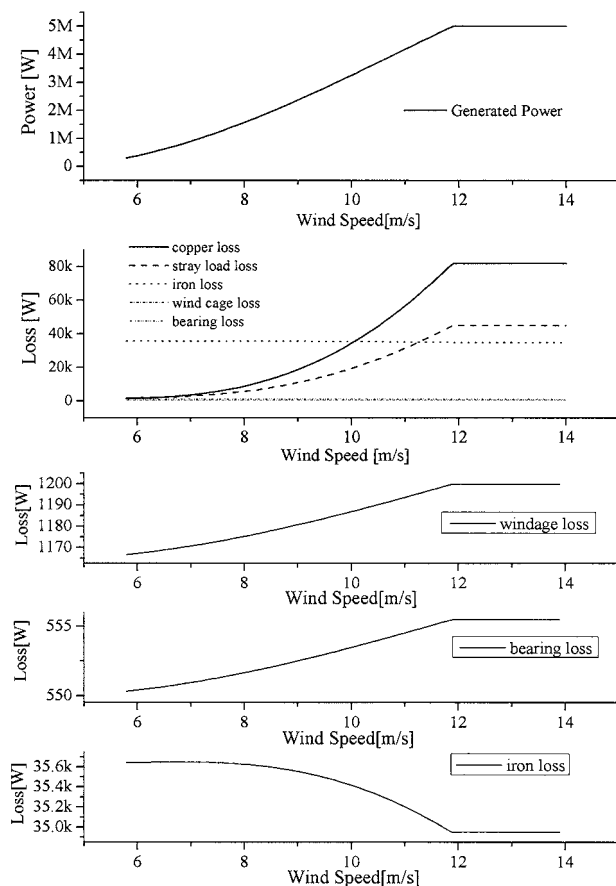


図6 発電機の状態量

Fig. 6. State variables of generator.

**2・6 計算結果** 表2に本論文で使用する風力発電機の定数を記載する。風力発電機の大型化を見込み、5 MWの風力発電機を想定した。鉄損抵抗は、定格状態における鉄損に相当する抵抗である。風速を入力として提案手法により計算した発電機状態量の特性を図6に示す。カットイン風速が5.8 [m/s]で定格風速は12.5 [m/s]である、それ以降はピッチ制御により定格出力になるものとした。これより風速に応じて出力が変化しているのがわかる。機械損と鉄損の変化が見えにくい拡大図を示してある。これより、機械損も他の損失と同様に風速の上昇に応じて上昇していることがわかる。また、鉄損が風速の上昇(発電機出力の上昇)に従い減少している。これは発電機出力の上昇に応じて系統側から受け取る無効電力が増えることによって発電機内部電圧が下がり、磁束密度が減少するためである。

### 3. 過渡現象を含んだ解析との比較

これまで説明してきたように、本手法では基本的に定常状態の等価回路を基礎として計算を行うが、現実の変動風速を想定した場合には、発電機内で過渡現象が生ずる可能性がある。そこで以下では、過渡現象を考慮した計算と提案手法による結果の差異について確認する。過渡現象解析ツールとしてPSCAD/EMTDCを使用した。PSCAD/EMTDCは汎用電磁過渡現象解析ソフトEMTP<sup>(7)</sup>と同じ理論ベースの元に作成されており、電力系統はもとより同期発電機を初めとする種々の回転機の過渡現象解析においても高い精度を有することは広く認められている。一例として、誘導機形風力発電機の解析<sup>(8)</sup>や巻線形誘導機をベースとした可変速フライホイール発電機<sup>(9)</sup>等の過渡現象解析に適用されている。

風速パターンを3つ用意し、これらを入力した時の提案手法による計算結果とPSCADを用いて行った過渡現象を含む解析結果とを風速1周期分のエネルギー量において比較する。提案手法では定常状態計算であることから過渡現象を模擬できないため、この影響が一般的に大きくなるかどうかを見極めるために、時定数を変えた場合についても検討を行った。すなわち発電機回転子抵抗をそれぞれ1/2、1/5とした計算も行った。これは回転子抵抗( $r_2'$ )の減少とともに時定数(表2の定数に対する短絡過渡時定数 $T'$ は0.062 s)が大きくなり、定常解析の誤差が大きくなると想定したからである。回転子抵抗1/5の場合で短絡過渡時定数は約0.3秒となるが、これは誘導機としては非常に大きく、ほぼ限界的な値と考えられる。なお、PSCADにおいては鉄損抵抗を変化させることができない。そのため、ここでは提案手法の基礎とする等価回路をPSCADにおいても計算可能な固定鉄損抵抗の形に変更した。

風速変化については、20、5、1秒周期の波形を用いて図7に示される3種類の風速パターンを作成した。それぞれwind1が20秒周期(一般的な風速変動)、wind2は20秒周期に5秒周期(突風などの乱風)を重ねたものであり、wind3はさらに1秒周期を重ねたものである。1秒周期の

風は自然風を考えた場合にかなり短周期と考えられるが、提案法の精度の確認のために設定した。これら3つの風速変化を入力とし、PSCADと提案手法で計算した発電機出力の応答を図8に示す。PSCADの計算においては1秒以降に発電機を始動させるプロセスが必要なために過渡現象が発生しているが、それ以降は提案法による結果とほぼ同じ値を示している。以上により、過渡現象を含めた計算結果と提案手法の結果にほとんど違いがないことがわかる。また、表3に20秒以降の1周期分(20秒間)を積分して得たエネルギーを示した。1周期分の出力および損失エネルギーにおいても3種類の風速変化に対して両手法の違いはほとんど現れず、wind3のような複雑な風速変化においても誤差は小さいことがわかった。

次に、回転子抵抗を変化させた場合の1周期分のエネルギー量の計算結果を同じく表3に示している。この結果からも両者の差は非常に小さいことがわかる。これより、時定数の大きな発電機にwind3のような変化の大きい風速が入力されても過渡現象に起因する計算の誤差はほとんど生じない事がわかった。一方、同じ風速入力(wind3)にもかかわらず回転子抵抗が小さくなるにつれて風車から発生するエネルギーが減少していることが分かる。これは、回転子抵抗による比例推移に基づいて、回転子抵抗の減少に従い同じ風速にもかかわらず風車の運転回転数がわずかに下がるためである。以上により、一般的に過渡現象の影響は小さく定常状態解析に基づく計算によって十分な精度の計算結果が得られ、提案手法が一般的であることが分った。

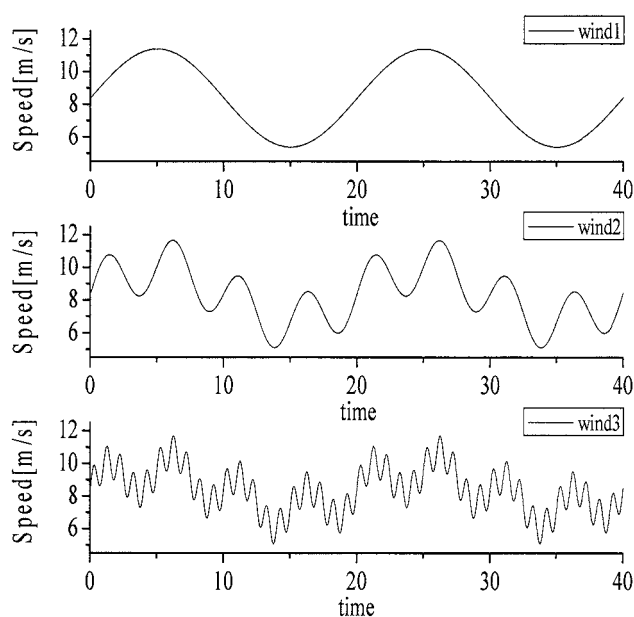


図7 風速変化パターン

Fig. 7. Wind speed variation.

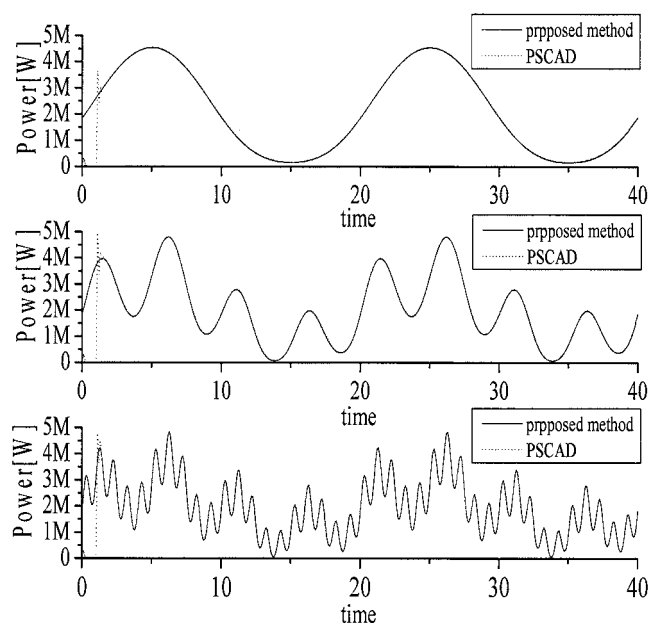


図8 発電機出力

Fig. 8. Output power of IG.

表3 計算結果(I)

Table 3. Calculation results, (I).

		Wind turbine energy[MJ]	Iron loss [MJ]	Copper loss[MJ]	Windage loss[MJ]	Bearing loss[MJ]	Stray load loss[MJ]	Generated power[MJ]	Energy efficiency[%]
Wind1	PSCAD	43.88	0.69	0.47	0.023	0.011	0.27	42.40	96.64
	Proposed method	43.88	0.69	0.47	0.023	0.011	0.27	42.42	96.67
Wind2	PSCAD	42.04	0.69	0.39	0.023	0.011	0.22	40.07	96.81
	Proposed method	42.03	0.69	0.39	0.023	0.011	0.22	40.06	96.78
Wind3	PSCAD	40.96	0.69	0.34	0.023	0.011	0.20	39.70	96.90
	Proposed method	40.95	0.69	0.34	0.023	0.011	0.20	39.67	96.87
Wind3 ( $r_2' \rightarrow 1/2$ )	PSCAD	40.96	0.69	0.24	0.023	0.011	0.20	39.80	97.14
	Proposed method	40.95	0.69	0.24	0.023	0.011	0.20	39.77	97.12
Wind3 ( $r_2' \rightarrow 1/5$ )	PSCAD	40.96	0.69	0.18	0.023	0.011	0.20	39.85	97.29
	Proposed method	40.95	0.69	0.18	0.023	0.011	0.20	39.85	97.26

#### 4. 確率分布関数を用いた総合効率算定<sup>(10)(11)</sup>

提案手法に確率分布関数により表現した風況データを適用し、風力発電機の総合効率を算定する。前章での検討より、過渡現象計算を行わずに提案法により風力発電機状態量を高速に算定できることが分った。しかしながら、例えば一年間の風況データを時間関数で表して総合効率の計算を行うことは実際的ではない。そこで確率分布関数を用いて年間の風況を再現し、効率算定を行う手法を以下に提案する。一般に風速の出現頻度分布曲線は左右非対称であり、最大度数は弱風側に偏っている特徴をもつ。それを曲線近似する関数の1つがワイブル関数であり、風況解析に最適な関数と言われている。

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \dots\dots\dots (16)$$

( $k$ : 形状定数  $c$ : 尺度定数  $v$ : 風速)

$f(v)$  は風速 ( $v$ ) が現れる確率密度関数であり、 $k$  は形状係数 (風速階級分布の形を示すパラメータ)、 $c$  は尺度係数 (風速の相対累積度数が 63.2% の時の風速に相当) である。

(16) 式より風速の出現頻度が計算できる。また、年間平均風速が同じでも 2 つのパラメータ  $c, k$  が異なると風況が異なり発電量にも変化が現れることになる。本論文の計算では、パラメータの決定に NEDO の LAWEPS (Local Area Wind Energy Prediction System)<sup>(2)</sup> を用いた。LAWEPS は複雑な地形に対応するために非線形流体力学計算も含むが、ここではホームページ上で公開されている気象モデル計算 (最小 500 m メッシュ) の結果を直接用いた。そこで得られる 2 つのワイブル関数パラメータを使用し、風速の出現確率を求め、一年間の総発電量と損失、総合効率ならびに設備利用率を算定する。発電機モデルは表 2 の誘導発電機であり、カットイン風速を 5.8 [m/s]、定格風速を 12.5 [m/s] と定め、定格風速を超えたときには風車ピッチ角を変更し常に定格出力で運転するものとする。なお、カットアウト風速を 20.1 [m/s] とし<sup>(4)</sup>、それ以上の時には発電を停止する。今回の計算では、現実に風力発電機が設置されているか否かに拘わらず、表 4 に示すワイブルパラメータが異なる 3 つの地域を選定した。この際、5 MW の発電機を想定しているため、想定されるナセル高に合わせ地上高 70 m の風況データを用いた。また、風向きの出現確率も公開されているが、本論文では常に風力発電機が最適な角度で風を受けるものとして計算した。A (北見市) は内陸部で風の比較的弱い地域、B (襟裳岬) は岬の先端部分で強風地域、また C は富士山の斜面である。図 9 に (16) 式より計算された確率分布曲線を示すが、風速の出現確率は 3 つの地域で大きく異なる事がわかる。

総合効率と設備利用率の計算方法は、運転領域の風速出現確率に 365 日 (8760 時間) を乗じて年間の発電エネルギーを求め、それを (17) 式を用いて運転風速範囲 (5.1 [m/s] ~ 20.1 [m/s]) で積分する。

表 4 ワイブルパラメータ

Table 4. Weibull parameters.

	area	Ave. wind speed [m/s]	c	k
A	Kitami city	5.3	6.0	1.6
B	Erimo cape	9.0	10.0	2.2
C	Mt. Fuji's slope	10.5	9.5	1.6

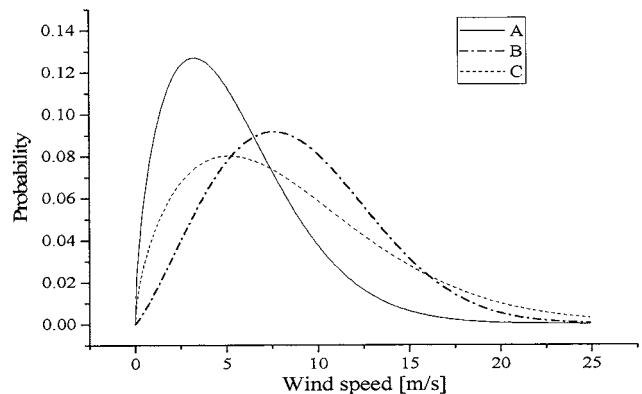


図 9 確率密度分布グラフ

Fig. 9. Probability density distribution.

$$E_{total} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} P_g(v) \times f(v) \times 8670 dv \dots\dots\dots (17)$$

( $E_{total}$ : 年間発電電力 [Wh]  $P_g$ : 発電電力 [W]  
 $V_{max}$ : カットアウト風速  $V_{min}$ : カットイン風速)

上式より風力発電機の年間発電総エネルギー量を求めることができる。その他の損失や風車獲得エネルギーは (3)~(15) 式を  $P_g$  の代わりに用い、同様に積分することで計算できる。また総合効率と設備利用率は次式より求められる。

$$\text{総合効率} = \frac{\text{発電量 [Wh]}}{\text{風車取得パワー [Wh]}} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{発電量 [Wh]}}{\text{定格出力 [W]} \times 365 \times 24 [\text{h}]} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (19)$$

表 5 に計算結果を示す。この結果は一年間運転風速領域で常に発電を行った場合の結果であり、実際にはメンテナンスや故障などにより、より少なくなることが予想される。この結果から 3 つの地域では発電量に大きな差があり、設備利用率にも大きな違いがあることがわかる。富士山斜面は襟裳岬周辺よりも平均風速が高いにもかかわらず年間発電量は低い結果となった。これはカットアウト風速以上の風が頻繁に発生するために年間運転可能時間が少なくなるためである。表 6 にワイブル関数と運転風速領域で決定されるそれぞれの地域での一年間の発電運転時間を示す。

損失に関しては、図 6 から判断できるように発電機出力に従い増加する銅損や漂速負荷損は 3 地域に大きな違いが

表 5 計算結果 (II)

Table 5. Calculation results, (II).

	Wind turbine energy[MWh]	Iron loss [MWh]	Copper loss[MWh]	Windage loss[MWh]	Bearing loss[MWh]	Stray load loss[MWh]	Generated power[MWh]	Total energy efficiency[%]	Capacity factor[%]
A	7697.31	121.80	83.01	3.94	1.89	47.91	7438.57	96.63	16.98
B	20410.14	227.30	261.66	7.54	3.55	146.88	19762.98	96.82	45.12
C	16935.81	186.63	221.01	6.18	2.92	123.93	16394.93	96.80	37.43

表 6 運転時間

Table 6. Operation time.

	area	Operation time [h]
A	Kitami city	3433.42
B	Erimo cape	6433.68
C	Mt.Fuji's slope	5284.30

ある。また、機械損や鉄損などは発電機出力に対して大きな変動は起こらないが、運転時間の差により地域による差が現れていると考えられる。

## 5. あとがき

本論文では、誘導発電機から構成される風力発電機の総合効率算定を目的として、初めに定常状態等価回路を基礎として風速を入力とした場合の風車および発電機の出力・損失等の状態量を算定する手法を提案した。続いて、変動風速パターンに対する発電機出力および各損失の応答を過渡現象解析ソフト PSCAD と提案手法の両方で計算し、比較した。その結果、両者の解析結果の差は小さく、定常状態に基づく提案手法の解析ではほぼ正確な結果が得られることが判明した。もちろんこのように PSCAD によっても風力発電機の状態量や効率を計算することは可能であるが、風速変化を入力とする時間シミュレーションが必要であり、計算時間の点で例えば年間の設備利用率を求めることなどはほとんど不可能である。一方、提案手法では風況データを使用して非常に高速に発電機状態量や効率の算定が可能である点が最大の特徴である。第 4 章ではこの一例として、ワイブル関数で表現した風速データを用いて年間の発電電力量を計算し、年間総合効率および設備利用率の算定を行った。これによって、ワイブルパラメータ等の風況データが得られれば、その地点の年間総合効率や設備利用率を高速に推定することが可能となり、風力発電機の設置地域選定や個々の風況に即した発電機の設計などに非常に有効に適用できると考えられる。

今後の課題として、最近増加している同期発電機を用いた可変速タイプの風力発電機へ本手法を適用することが重要である。この場合、AC/DC/AC 変換器で発生する損失分の算定も必要であり、現在検討を進めているので、結果が

得られ次第発表したいと考えている。

(平成 17 年 1 月 6 日受付, 平成 17 年 5 月 26 日再受付)

## 文 献

- (1) PSCAD/EMTDC, <http://www.hvdc.ca>
- (2) NEDO LAWEPS, <http://www2.infoc.nedo.go.jp/nedo/top.html>
- (3) A. Inoue, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, M. Kimura, M. Futami, and K. Ide: "Calculation of the steady state operating conditions of wind generators using induction machines", The Paper of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan, RM-04-39 (2004) (in Japanese)  
井上 彬・高橋理音・村田年明・田村淳二・木村 守・二見基生・井出一正: 「誘導機による風力発電機の定常運転時状態量の算定」, 回転機研資, RM-04-39 (2004)
- (4) O. Wasynczuk, D.T. Man, and J.P. Sullivan: Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators During Random Fluctuations, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, No.6, pp.2837-2854 (1981)
- (5) 電気学会通信教育会: 電気機器設計 (第二次改訂版) 電気学会
- (6) 竹内寿太郎: 電機設計学 (改定 2 版) オーム社 (1993)
- (7) EMTP Theory Book, 日本 EMTP 委員会 (1994)
- (8) H. Akagi, K. Takahashi, and H. Sato: "Control Strategy and Dynamic Performance of a Doubly-Fed Flywheel Generator-Motor", T. IEE Japan, Vol.118-D, No.11, pp.1308-1314 (1998-11) (in Japanese)  
赤木泰文・高橋賢司・佐藤 皓: 「交流励磁フライホイール発電機の制御法と過渡特性」, 電学論 D, **188**, 11, pp.1308-1314 (1998-11)
- (9) Y. Sasaki, N. Harada, T. Kai, and T. Sato: "A Countermeasure against the Voltage Sag due to a Inrush Current of Wind Power Generation System Interconnecting to a Distribution Line", T. IEE Japan, Vol.120B, No.2, pp.180-186 (2000-2) (in Japanese)  
佐々木裕治・原田憲明・甲斐隆章・佐藤達則: 「風力発電システムの系統並列時の瞬時電圧低下とその対策について」, 電学論 B, **120**, 2, pp.180-186 (2000-2)
- (10) A. Inoue, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, M. Kimura, M. Futami, and K. Ide: "Calculation of the total efficiency of wind generators in steady state operation", The Paper of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan, RM-04-99 (2004) (in Japanese)  
井上 彬・高橋理音・村田年明・田村淳二・木村 守・二見基生・井出一正: 「風力発電機の定常運転時の総合効率算定」, 回転機研資, RM-04-99 (2004)
- (11) A. Grauers: "Efficiency of three wind energy generator systems", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.11, No.3, pp.650-657 (1996)

井上 彬 (学生員) 1981 年 12 月 11 日生。2004 年 3 月北見工業大学卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻、現在に至る。風力発電機の効率に関する研究に従事。





---

高橋理音（正員）1976年1月4日生。1998年3月北見工業大学電気電子工学科卒業。同年4月北見工業大学電気電子工学科教務職員となり、現在に至る。主として電力系統および可変速発電機に関する研究に従事。



木村守（正員）1974年7月7日生。1999年3月東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士課程前期修了。同年4月（株）日立製作所入社。研究開発本部日立研究所に勤務。回転電気機械の研究開発に従事。



村田年昭（正員）1943年4月27日生。1966年3月北海道大学工業教員育成所電気工学科卒業。同年合同容器（株）入社。現在、北見工業大学助教授。工学博士。主として、最適制御理論を応用したベクトル制御系の制御系構成法の研究に従事。



二見基生（正員）1962年6月11日生。1987年3月室蘭工業大学修士課程電子工学専攻修了。同年4月（株）日立製作所入社。現在、同社日立研究所にてパワーエレクトロニクス機器応用技術に関する研究に従事。



田村淳二（正員）1957年1月17日生。1984年3月北海道大学大学院博士課程修了。現在、北見工業大学電気電子工学科教授。1991年9月より10カ月間米国テキサス大学客員研究員。同期機および電力系統の解析に関する研究に従事。工学博士。電気設備学会，日本風力エネルギー協会会員。IEEE Senior Member。



井出一正（上級会員）1964年1月5日生。1988年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士前期課程修了。同年4月（株）日立製作所入社。主として回転機の研究開発に従事。現在、研究開発本部日立研究所主任研究員。工学博士。1993年，2001年電気学会論文賞，2002年オーム技術賞受賞。日本応用磁気学会会員。IEEE Member。

