誘導発電機を用いた風力発電機の EMTP 解析モデル

正員 徳永 義孝*

正員 飯尾 尚隆**

正員 田能村 顕一***

正員 篠原 裕文***

EMTP Simulation Model of a Wind Turbine Generator using Induction Generator

Yoshitaka Tokunaga*, Member, Naotaka Iio**, Member, Kenichi Tanomura***, Member,
Hirofumi Shinohara***, Member

This paper presents an EMTP simulation model for the wind turbine generator using induction generator. This model was developed to add the model of a wind turbine portion to the precision model using the standard specification data and operation data of induction generator. It verified that the inrush current at starting and the residual voltage at islanding state were analyzed, and measured data could be reproduced by this model.

キーワード：誘導発電機，風力発電機，EMTP，突入電流，単独運転

Keywords: induction generator, wind turbine generator, EMTP, inrush current, islanding

1. はじめに

石油代替エネルギーの確保と地球環境問題への対策として，風力発電に対する注目が高まり，近年の導入量増加がめざましい。またグリーン電力制度の発足に伴い，風力発電機の逆潮流有りによる系統連系が益々増加していく勢いである。

現在，出力変動を軽減できる利点から，風力発電機に同期発電機とインバータを用い，交流-直流-交流と変換して連系する方式が注目されてきている⁽¹⁾。ところが，依然として多くの風力発電機には構造が簡単で保守性が良く，堅牢なご型誘導発電機が用いられており，電力系統へ連系する場合，系統並入時の突入電流や系統解列後の単独運転状態での残留電圧（自己励磁現象）を把握できることが，安全確保や系統への影響を評価する上で重要である。

誘導発電機の過渡現象については数々の研究例があるが，その多くが並入時の突入電流⁽²⁾，あるいは系統解列時の残

留電圧⁽³⁾ どちらか片方を対象としている上，実系統に連系した実機を対象にした実測と解析との比較検討例はさらに限られている⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。系統連系した風力発電機についても突入電流の実測と解析との比較検討例はある⁽⁸⁾⁽⁹⁾が，単独運転状態まで含めた実測・解析例はほとんどみられない状況にある。さらに，系統連系技術要件検討委員会報告書には「現時点では誘導発電機の自己励磁現象等の影響が評価できる的確なシミュレーションモデル（単体モデル）が確立されていない」との指摘もあり⁽¹⁰⁾，誘導発電機実機の過渡現象をよく表すことができる解析モデルを構成し，系統連系前に詳細評価ができることが必要になると考えられる。

筆者らは TEPCO 新エネルギーパーク 300kW 風力発電装置を対象に，EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) を用いて並入・解列時の実測値をよく再現できた解析手法について先に報告した⁽¹¹⁾が，この手法ではかご型回転子の寸法が既知であることが必要である。今後誘導発電機を用いた商用の風力発電機に対し，この解析手法を系統運用者などが用いる場合，回転子の寸法など形状に関するデータは一般に入手が困難であることが予想される。

そこで本稿では誘導発電機に対して一般的に得られる試験成績データを使用した詳細モデルに，風車部分のモデルを付加して系統並入時の突入電流および系統解列後の単独運転状態での残留電圧を EMTP 解析できる手法を検討する。また実機で得られた実測結果と解析結果とを比較検討する。さらに 6.6kV の高圧配電線に 300kW 風力発電装置 5 台を連系した場合のモデル系統を構成し，並入時に対して行った解析例について述べる。

* 東京電力（株）技術開発研究所

〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

R&D Center, Tokyo Electric Power Company

4-1, Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-8510

** ティーエム・ティーアンドディー（株）

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-12-1

TM T&D Corporation

3-12-1, Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001

*** (株) 東芝

〒183-8511 府中市東芝町 1

Toshiba Corporation

1, Toshiba-cho, Fuchu 183-8511

2. 300 kW 風力発電装置の概要

TEPCO 新エネルギーパークの 300 kW 風力発電装置の外形および主な諸元はそれぞれ図 1、表 1 の通りである。国内の 2 枚翼風力発電装置では最大容量である。発電機はかご型誘導発電機を使用しており、出力電圧は 6.6 kV である。これを火力発電所の 6.6 kV 所内回路に接続し、逆潮流ありの系統連系システムを図 2 のように構成している。風

図 1 300 kW 風力発電装置の外形写真

Fig. 1. Photo of 300 kW wind turbine generator system (WTGS).

表 1 風力発電装置の諸元

Table 1. Specification of 300 kW WTGS.

Rated output	300kW
Cut-in	6m/s
Rated wind speed	13m/s
Cut-out	25m/s
Rotor diameter	29.6m
Rotor speed	62min ⁻¹
Number of blade	2
Generator type	Induction Generator
Number of pole	4 pole
Rated voltage	6.6kV
Output control	Pitch control
Hub height	30m

力発電装置の風速-発電電力特性⁽¹²⁾は以下の通りである。風速が 6 m/s になると風車ロータを起動させ、発電機の回転速度が 1500 min⁻¹ に達すると系統へ直入れ投入し発電を開始する (カットイン)。風速が 6 m/s から 13 m/s までの間、ほぼ風速の 3 乗に比例した発電出力を発生し、13 m/s で定格出力 300 kW に達する。13 m/s 以上の風速では出力を一定に保つようにブレード (風車翼) のピッチ角を自動制御する。さらに風速が 25 m/s を越える場合、安全機構が働き、ブレードを水平の位置で自動停止する (カットアウト)。

3. 誘導発電機の等価回路モデル

〈3・1〉誘導機の物理現象 誘導機 (電動機・発電機) を EMTP 上でモデル化するために、ここでは一般的な UM (Universal Machine) モデルを用いる。UM モデルでは基本的に図 3 に示す T 形等価回路⁽¹³⁾に対応する各定数値を設定することにより、誘導機モデルを実現できる。

しかし、UM モデルを用いた EMTP 解析では、定常時の運転諸量について妥当な結果を得ることができても、今回対象とした 300 kW 風力発電装置については、EMTP 解析における系統並入時の突入電流の最大値が、実測値の約 60% となることが明らかになった⁽¹²⁾。

そこで、実測値をよく再現できるモデルを構成するため、誘導機の物理現象として知られている以下の 2 点に着目した。

(1) 回転子インピーダンスの周波数依存特性 かご形誘導機には回転子インピーダンスの周波数依存特性が存在する。これは二重かご形構造に特有のものではなく、単一かご形構造にも見られる特性である⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。回転子に流れる電流は、定常運転時にすべり周波数であるのに対し、系統並入直後には過渡直流分の発生により基本波に近い周波数となるため、表皮効果によって回転子の漏れインダクタンスは定常運転時よりも減少し、抵抗は増加する。

(2) 漏れインダクタンスの飽和特性 誘導機には漏れインダクタンスの飽和特性が存在する⁽¹⁶⁾。特に図 4 に示

図 2 単線結線図

Fig. 2. One-line diagram of 300 kW WTGS.

図3 誘導機 T 形等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of induction machine.

図4 回転子の漏れ磁束 ϕ
Fig. 4. Leakage flux ϕ of rotor.

表2 誘導発電機の試験成績データ項目

Table 2. Test data item of induction generator.

Test data item
Measurement of stator resistance
No load test
Lock test
Maximum torque

すようなかご型回転子のスロットが全閉形の場合、先端に磁束が集中し飽和しやすい構造となる。系統並入時には突入電流の多くが漏れインダクタンスに流れるため、その電流値は漏れインダクタンスの飽和による影響を大きく受ける。

〈3・2〉詳細 T 形等価回路 先述の回転子インピーダンスの周波数依存特性や漏れインダクタンスの飽和特性を考慮した詳細モデル表現を行う。まず、誘導発電機の試験成績データから図3の T 形等価回路における基本的な各定数を求める。今回用いた試験成績データの項目は表2の通りである。

まず、固定子抵抗測定から固定子抵抗 r_1 が得られる。次に無負荷試験から、無負荷インピーダンス ($r_0 + jx_0$) は固定子の漏れインピーダンス ($r_1 + jx_1$) と励磁インピーダンス ($r_m + jx_m$) の和として次式で算出できる。

$$r_0 + jx_0 = (r_1 + jx_1) + (r_m + jx_m) \\ = \frac{W_0}{3I_0^2} + j \frac{\sqrt{3(V_1 I_0)^2 - W_0^2}}{3I_0^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで I_0 : 無負荷電流, W_0 : 入力電力

また拘束試験から、固定子漏れリアクタンス x_1 と始動時 (すべり : $s = 1$) の回転子漏れリアクタンス x_{2st} は拘束インピーダンス Z_S のリアクタンス分から、次式で求められる。

$$x_1 = x_{2st} = \frac{1}{2} I_m [\dot{Z}_S] \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $|\dot{Z}_S|$ は次式の通りである。

図5 二重かご型誘導機の T 型等価回路

Fig. 5. T type equivalent circuit of double cage induction machine.

$$|\dot{Z}_S| = \frac{V'_S}{\sqrt{3} I'_{st}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 V'_S : 印加電圧, I'_{st} : 拘束電流

すると、すでに得られた r_1 と (1), (2) 式から、励磁インピーダンス ($r_m + jx_m$) が次式で求められる。

$$r_m + jx_m = (r_0 - r_1) + j(x_0 - x_1) \dots\dots\dots (4)$$

なお、励磁リアクタンス x_m については無負荷飽和特性から得られる飽和曲線データを適用できる。また、始動時の回転子抵抗 r_{2st} は次式で求められる。

$$r_{2st} = \text{Re} \left[\frac{\{ \dot{Z}_S - (r_1 + jx_1) \} \cdot (r_m + jx_m)}{(r_0 + jx_0) - \dot{Z}_S} \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここで、定常運転時 ($s = 0$) の回転子漏れリアクタンスを x_{20} と表わすと、誘導発電機の最大トルク T_m は同期ワットで表現して、一般的に次式のようになる⁽¹⁴⁾。

$$T_m = \frac{V_1^2}{2 \{ r_1 - \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{20})^2} \}} \dots\dots\dots (6)$$

いま、 V_1 , T_m , r_1 , x_1 は既知となるので、(6) 式から x_{20} を求めることができる。

漏れリアクタンスについては先述の通り飽和特性があるため、固定子および回転子の漏れリアクタンスに飽和特性を反映させることで考える。ここでは回転子部分を詳細に表現する場合に用いられる図5のような二重かご型誘導機の等価回路⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾を出発点とし、Rogers, Shirmohammadi の誘導電動機に対する研究内容⁽¹⁷⁾に準じた詳細等価回路を導出した。

固定子、回転子それぞれの漏れリアクタンスについて、飽和に関与する部分 (飽和分) と関与しない一定値 (非飽和分) とに分けて考える。いま、固定子と回転子の漏れリアクタンスの合計を x_{tl} とし、このうち飽和分を x_{ts} , 非飽和分を x_{to} とすると、次の関係式で表される。(7) 式の DF は、(8) 式に示されたように、飽和領域で変化する係数である。

$$x_{tl} = x_{to} + DF \cdot x_{ts} \dots\dots\dots (7)$$

図 6 漏れリアクタンスの電流変化

Fig. 6. Variation of leakage reactance with current.

図 7 誘導機の詳細 T 型等価回路

Fig. 7. Precision T type equivalent circuit of induction machine.

$$\left(\begin{array}{l} DF = 1 \quad (I \leq I_{sat}) \\ DF = \frac{2}{\pi} \left(\alpha + \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \right) \quad (I > I_{sat}) \\ \alpha = \sin^{-1} \frac{I_{sat}}{I} \end{array} \right) \quad (8)$$

これを図示すると図 6 となる。漏れリアクタンスを流れる電流 I が飽和電流値 I_{sat} 以下であれば x_{ll} は $(x_{lto} + x_{lts})$ で一定であるが、 $I > I_{sat}$ では x_{ll} は減少し、飽和現象を示す。ここで飽和電流値 I_{sat} が入手できない場合、 $I_{sat} = 2^{(pu)}$ と仮定する⁽¹⁷⁾。

次に固定子、回転子漏れリアクタンスの非飽和分 x_{lto}, x_{2to} 、および飽和分 x_{lts}, x_{2ts} については定格電圧 V_1 および低減電圧 V_{red} に対して拘束試験でそれぞれ得られる始動電流 I_{st}, I_{red} 、さらに固定子抵抗 r_1 と始動時の回転子抵抗 r_{2st} を用いて、求めることができる⁽¹⁷⁾。

ここで回転子の始動インピーダンス $r_{2st} + jx_{2st}$ と定常運転時のインピーダンス $r_{2o} + jx_{2o}$ を用いて、Design ratio m として次式を定義する⁽¹⁸⁾。

$$m = \frac{r_{2st} - r_{2o}}{x_{2o} - x_{2st}} \quad (9)$$

図 5 の等価回路における r_{2A}, r_{2B}, x_{2B} 、および x_{2AB} の非飽和分に相当する x_{2C} は、(9) で求まる m 値を用いて (10)~(13) 式でそれぞれ求めることができる。

$$r_{2A} = r_{2st}(1 + m^2) - r_{2o}m^2 \quad (10)$$

$$r_{2B} = \frac{r_{2A} \cdot r_{2o}}{r_{2A} - r_{2o}} \quad (11)$$

$$x_{2C} = x_{2to} - r_{2o} \cdot \frac{r_{2A}}{r_{2B}} \cdot \frac{m}{m^2 + 1} \quad (12)$$

$$x_{2B} = \frac{r_{2A} + r_{2B}}{m} \quad (13)$$

以上から固定子及び回転子の漏れリアクタンスを、飽和

図 8 風力発電機でのエネルギーの入出力状態

Fig. 8. Energy input-output state at the wind turbine generator.

特性を示す飽和部 (x_{lts}, x_{2ts}) と、非飽和部 (x_{lto}, x_{2to}) にそれぞれ分割し、さらに回転子漏れリアクタンスの非飽和部については、周波数依存特性を反映した等価回路で表現して図 7 のような詳細 T 型等価回路を構成することができる。

4. 風車モデル

今回対象とした 0.1~2 秒程度の過渡現象を考える場合、後述の通り風速はほぼ一定として解析できると考えられる。ところが定常運転中に風速急変が生じたときの解析を行う場合などでは風速変動を反映できる風車モデルを組み込む必要がある。今、風車のエネルギー入出力関係を図示すると、図 8 のようになる。EMTP の UM モデルでは、回転機械系を電気回路に変換してブランチデータと電流源でモデル化し、発電機に入力トルクを与えている。今回は風車のエネルギー入出力関係を表した (付 1)~(付 5) 式および風速の時系列変化を TACS で記述し、電流源に引き渡すことによって、風速の変動による入力トルクの変動を表現できる風車モデルとした。

5. 系統並入時の突入電流の検討

〈5・1〉 実機による測定 図 2 において力率改善コンデンサ (70kVA) を開放した状態で負荷開閉器 S1 を投入し、風力発電機を 6.6kV 系統に並入したときの三相電流の瞬時値を測定した。測定中、タワー高さでの風速は 8m/s ではほぼ一定であった。結果を図 9 に示す。電流波高値の最大値は 660A であり、定格電流波高値 (37.1A) の 17.8 倍であることがわかる。また、図 9 において、R 相電流の第 2 波以降に歪みがみられた。測定を数回行った結果、他の 2 相にもそれぞれ同様の歪みがみられた。このことから並入時のショックによって風車ロータの回転に不均一な部分が生じたためとも考えられるが、誘導発電機単体を用いた突入電流を別途測定し、今回の測定結果との比較検討を行う必要があると考えられる。

〈5・2〉 EMTP による解析 対象発電機の実験結果をもとに、(1)~(13) 式から導出した詳細 T 型等価回路 (図 7) の各定数値は表 3 の通りである。抵抗については実機測定時の発電機巻線温度 32.3°C 時の値を用いた。なお系統定数については図 2 に記載した値となる。以上の条件に加え、風速一定の条件で風車ロータは均一に回転すると

仮定して、三相電流の瞬時値を EMTP で解析した。この結果を図 10 に示す。

図 9 の R 相電流で見られた波形の歪みを除けば、実測波形と類似した結果が得られたと考える。また電流波高値の最大値は 662 A であり、実測値とほぼ一致した値が得られていることがわかる。系統並入時の突入電流の最大値を予測する場合、本モデルは有効であると考えられる。比較のために UM モデルによる EMTP 解析を行うと、図 11 の結果

図 9 系統投入時の突入電流 (実測)

Fig. 9. Inrush current (experiment).

表 3 EMTP 解析で用いた等価回路定数

Table 3. Generator data used EMTP simulation.

Stator impedance	$r_1 = 0.767 \text{ } (\Omega)$ $x_{1d} = 4.70 \text{ } (\Omega)$ $x_{1q} = 4.66 \text{ } (\Omega)$
Rotor impedance	$r_{2d} = 4.66 \text{ } (\Omega)$ $r_{2q} = 1.14 \text{ } (\Omega)$ $x_{2d} = 4.66 \text{ } (\Omega)$ $x_{2q} = 13.5 \text{ } (\Omega)$ $x_{2c} = 3.34 \text{ } (\Omega)$
Mutual impedance	$r_m + jx_m = 17.39 + j 461 \text{ } (\Omega)$

図 10 系統投入時の突入電流 (詳細 T 型等価回路)

Fig. 10. Inrush current (EMTP simulation using precise T equivalent circuit).

図 11 系統投入時の突入電流 (UM モデル)

Fig. 11. Inrush current (EMTP simulation using UM model).

となる。図 11 では、突入電流の最大値は実測と比較し大幅に小さくなり、実測値の約 60% である。

6. 単独運転状態の残留電圧の検討

(6.1) 実機による測定 図 2 において風力発電装置

図 12 単独運転状態の残留電圧 (実測)

Fig. 12. Residual voltage at islanding (experiment).

図 13 単独運転状態の残留電圧 (EMTP 解析)

Fig. 13. Residual voltage at islanding (EMTP simulation).

図 14 単独運転状態の残留電圧 (UM モデル)

Fig. 14. Residual voltage at islanding (EMTP simulation using UM model).

を運転中に CBO11 遮断器を開放し、線間電圧（三相）の瞬時値を測定した。測定中のタワー高さの風速は 13 m/s でほぼ一定であった。力率改善コンデンサ（70 kVA）を投入した場合の結果が図 12 の実測波形である。風力発電機が系統から切り離されても発電機端の電圧はほとんど低下せず、系統条件によっては単独運転が継続してしまうことを実機で確認できた。

〈6・2〉EMTP による解析 投入時突入電流の解析と同様に今回構成したモデルにより、風速 13 m/s 一定の条件で三相電圧の瞬時値を EMTP で解析した。結果を図 13 に示す。解析結果は図 12 の実測波形とほぼ同様な波形となり、単独運転の継続状態が再現できたと考えられる。また、UM モデルによる解析を行うと、図 14 に示すように実測波形とほぼ同様の波形が得られるが、遮断器開放 1 秒後で実測波形と比べると、電圧が減衰していく傾向が見られる。単独運転移行後の残留電圧は、発電機等価回路定数とコンデンサによって決まる時定数で減衰もしくは発散することから、今回構成した詳細 T 型等価回路において実機同様の発電機インピーダンスが模擬できていると考えられる。

7. 複数台における解析

今回構成した誘導発電機の風力発電機モデルを用い、複数台の風力発電機が連続して系統に並入した場合について

図 15 風力発電装置 5 台連系時の配電系統モデル

Fig.15. One-line diagram of distributed system model at connecting 5 wind turbine generators.

図 16 系統並入時の電圧降下 (EMTP 解析)

Fig.16. Voltage dips at connecting (EMTP simulation).

検討した。6.6 kV 配電線 5 km 地点に 300 kW 風力発電装置 5 台を連系した状態のモデル系統を図 15 のように構成し、風速を 6 m/s 一定として S1～5 の順にそれぞれ 40 ms 間隔で投入した場合について EMTP 解析を行った。6.6 kV 連系箇所の母線電圧の解析結果を実効値表示で図 16 に示す。風力発電装置を並入するごとに電圧降下を生じていることがわかり、本解析例では母線電圧が並入前に比べ、最大 1041 V (15.8%) 降下する結果が得られた。このことから並入時点が接近すると、電圧降下が重畳されることがわかる。ただし、現在の商用機はサイリスタ逆並列回路を用いた「ソフトスタート装置」を備えており、並入時の電圧降下は図 16 の解析例よりも緩和されることが予想されるが、さらに多くの台数を連系した場合、ソフトスタート装置を備えていても発電機相互の並入間隔を充分あけるなど、電圧降下が重畳しないような運転制御を行う必要があると考えられる。

8. まとめ

本稿では TEPCO 新エネルギーパーク 300 kW 風力発電装置を対象に、誘導発電機に対しては一般的に得られる試験成績データを用いて回転子インピーダンスの周波数依存特性および漏れインダクタンスの飽和特性を考慮した詳細 T 型等価回路を構成した。また風車の特性を反映し、風速変動も考慮できる風車モデルを付加し、誘導発電機を用いた風力発電機の EMTP 解析モデルを構成することができた。さらにこのモデルで系統並入時の突入電流と系統解列時の単独運転状態における残留電圧の EMTP 解析を行い、実機による測定結果をほぼ再現していることを確認できた。解析で用いた回路定数のうち、抵抗値については運転時の巻線温度に対する補正値を用いることが有効であった。風力発電機の場合、定格値での長時間連続運転が考えにくいことから、補正値を用いた解析結果は妥当であると考えられる。

加えて、配電系統に 300 kW 風力発電装置 5 台を連系したモデル系統による解析から、並入時点が接近した場合、系統電圧の降下が重畳されることが確認できた。多数台が異なる時間に投入・解列される場合や、他の分散電源が連系し系統が複雑になることも想定した様々な解析に、今回提案のモデルが有効になると考えられる。

今後の課題としては、突入電流の測定結果でみられた波形歪みについて、誘導発電機単体を用いた突入電流の測定を行って今回の測定結果と比較することにより、発生原因の検討を行いたいと考えている。また商用機の連系、特に多数台連系での過渡現象に対して本稿での解析手法の適用を検討し、並入時や単独運転状態における特性を検討していきたいと考えている。また、実系統における単独運転継続条件について今回のモデルを適用して検討していきたいと考えている。さらに、風速急変時の過渡特性の検討もあわせて行い、系統への影響を緩和できるような連系方法を検討していきたいと考えている。

最後に本研究を行うにあたり、実機でのデータ収集などでご協力いただきました石川島播磨重工業（株）風力発電システムグループの皆様、東京発電（株）富津新エネルギー運転センターの皆様に感謝します。
 （平成 14 年 2 月 27 日受付，平成 14 年 10 月 9 日再受付）

文 献

- (1) 鈴木・前川：「可変速風力発電システム」，電学誌，**121**，No.7，pp.450-453 (2001)
- (2) M. Sato, Y. Shima, H. Takahashi, and Y. Sanpei: "Study on the Inrush Currents of Induction Generators due to Abrupt Connection to Utility Power Networks," *T. IEE Japan*, Vol.111-D, No.8, pp.689-697 (1991-8) (in Japanese)
 佐藤正毅・志満嘉夫・高橋宏郎・三瓶義高：「誘導発電機の系統並列時突入電流に関する考察」，電学論 D，**111**，8，pp.689-697 (1991-8)
- (3) R. Nakamichi, J. Tamura, C. Nakazawa, and I. Chihara: "A Consideration on Islanding Operation of Induction Generator," *The Papers of Technical Meeting, IEE Japan*, RM-98-96 (1998) (in Japanese) etc.
 中道・田村・中沢・千原：「誘導発電機の単独運転に関する一考察」，電気学会回巻機研資，RM-98-96 (1998) 等
- (4) 杉本：「誘導発電機起動時の突入電流および電圧降下の計算式について」，四国電力研究期報，No.43，pp.24-29 (1984)
- (5) T.J. Hammons and S.C. Lai: "VOLTAGE DIPS DUE TO DIRECT CONNECTION OF INDUCTION GENERATORS IN LOW HEAD HYDRO ELECTRIC SCHEMES," *IEEE Trans. Energy Conversion*, **9**, No.3, pp.460-465 (1994)
- (6) 武内：「誘導発電機の自己励磁に関する研究」，中国電力技研時報，No.88，pp.35-50 (1997)
- (7) C.S. Demoulias and P.S. Dokopoulos: "TRANSIENT BEHAVIOUR AND SELF-EXCITATION OF WIND-DRIVEN INDUCTION GENERATOR AFTER ITS DISCONNECTION FROM THE POWER GRID," *IEEE Trans. Energy Conversion*, **5**, No.2, pp.272-278 (1990)
- (8) K. Tsuchiya, T. Matsuzaka, S. Yamada, T. Sakuma, and N. Inomata: "Simulation of Operating Characteristics of a Wind Energy Conversion System," *T. IEE Japan*, Vol.113-B, No.7, pp.752-759 (1993-7) (in Japanese)
 土屋敬一・松坂知行・山田佐佳・佐久間正・猪股登：「風力発電システムの運転特性シミュレーション—竜飛ウインドパークにおける場合—」，電学論 B，**113**，7，pp.752-759 (1993-7)
- (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 the Distribution Line," *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.2, pp.180-186 (2000-2) (in Japanese)
 佐々木裕次・原田憲朗・中斐隆章・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) 資源エネルギー庁編：解説 電力系統連系技術要件ガイドライン'98，p.161 (1998)
- (11) Y. Tokunaga, N. Iio, K. Tanomura, and H. Shinohara: "EMTP simulation model of a wind turbine generator using induction generator," *The Eleventh Annual Conference of Power & Energy Society, IEE of Japan*, No.231 (2000) (in Japanese)
 徳永義孝・飯尾尚隆・田能村顕一・篠原裕文：「誘導発電機を用いた風力発電システムの EMTP シミュレーション」，平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.231 (2000)
- (12) Y. Tokunaga, N. Iio, K. Tanomura, and H. Shinohara: "EMTP simulation model of a wind turbine generator using induction generator," *The Papers of Technical Meeting, IEE Japan*, PE-01-89/PSE-01-83 (2001) (in Japanese)
 徳永義孝・飯尾尚隆・田能村顕一・篠原裕文：「誘導発電機を用いた風力発電システムの EMTP 解析モデル」，電気学会電力技術・電力系統技術研資，PE-01-89/PSE-01-83 (2001)
- (13) Alternative Transient Program Rule Book, Leuven EMTP Center (1987)
- (14) 電気学会大学講座「電気機器工学 I」，電気学会
 野中：電気機器 (II)，森北出版 等
- (15) S. Hasegawa and S. Moriyasu: "Transient analysis of induc-

tion motor," *The Papers of Technical Meeting, IEE Japan*, RM-96-121 (1996) (in Japanese)

- 長谷川・森安：「誘導電動機の過渡現象解析」，電気学会回巻機研資，RM-96-121 (1996)
- (16) B.J. Chalmers and R. Dodgson: "Saturated leakage reactances of cage induction motors," *Proc. IEE*, **116**, No.8, pp.1395-1404 (1969)
 - (17) G.J. Rogers and D. Shirmohammadi: "INDUCTION MACHINE MODELLING FOR ELECTRO-MAGNETIC TRANSIENT PROGRAM," *IEEE Trans. Energy Conversion*, **EC-2**, No.4, pp.622-628 (1987)
 - (18) B.J. Chalmers and A.S. Mulki: "Design synthesis of double-cage induction motors," *Proc. IEE*, **117**, No.7, pp.1257-1263 (1970)

付 録

機械系の入出力特性

いま，風のエネルギー P_w によって風車に発生するトルクを T_w とすると，一般的に次式で表される。

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \dots\dots\dots (付 1)$$

$$T_w = Ct \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \dots\dots\dots (付 2)$$

v ：風速， ρ ：空気密度 (1.225 kg/m³)，

R ：風車ロータの半径， Ct ：風車自身のトルク係数

なお， Ct については風車ブレードの特性としてあらかじめ得られている次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} Ct &= (0.9661\beta - 2.3802)/100 \quad (\beta < 7.4) \\ Ct &= (-0.3587\beta + 7.3555)/100 \quad (\beta \geq 7.4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (付 3)$$

$\beta = 2\pi RN_w/v$ ：周速比，

N_w ：風車ロータの回転数 (s⁻¹)

すると T_w による発電機への入力電力 P_{in} は

$$P_{in} = T_w \cdot N_w \dots\dots\dots (付 4)$$

このとき発電機出力 P_{out} は実機による軸トルク測定結果から得られた次式によって求められる。

$$P_{out} = 1.0134P_{in} - 20763 \dots\dots\dots (付 5)$$

徳永義孝 (正員) 1964 年 10 月 31 日生。89 年 3 月九州大学大学院工学研究科修士課程電子工学専攻修了。同年 4 月東京電力 (株) 入社。主として，風力発電機の系統連系における解析，電力品質評価研究に従事。現在，(財) 国際超電導産業技術研究センター派遣。

飯尾 尚 隆 (正員) 1968 年 12 月 24 日生。91 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。同社電力・産業システム技術開発センターにおいて電力システムの解析および発電システム、変換器応用システムの研究開発に従事。2002 年 10 月ティーエム・ティーアンドディー (株) に出向。

篠原 裕 文 (正員) 1980 年 3 月筑波大学自然科学学類 (物理) 卒業。同年 4 月東京芝浦電気株式会社 (現 (株) 東芝) 入社。プラズマ核融合実験装置、電池電力貯蔵装置、太陽光発電装置の開発、システム設計に従事。電気学会進歩賞。

田能村 顕 一 (正員) 1964 年 1 月 20 日生。88 年 3 月大分大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在、同社電力・産業システム開発センターにてパワーエレクトロニクス応用電力機器、システムの研究開発、電力システムの異常現象および安定度問題解析に従事。