

有限要素法による環状巻スロットレスPMSGを用いた 小型風力発電システムのシミュレーション

徳永, 翔平
九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻

袈裟丸, 勝己
九州大学大学院システム情報科学府電気システム工学部門

<https://doi.org/10.15017/20059>

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 16 (2), pp.89-94, 2011-09-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン：

権利関係：



有限要素法による環状巻スロットレス PMSG を用いた 小型風力発電システムのシミュレーション

徳永 翔平* · 袈裟丸勝己**

Simulation of Small Wind Turbine Generation System Using Ring Winding Slotless PMSG by FEM

Shohei TOKUNAGA* and Katsumi KESAMARU**

(Received July 21, 2011)

Abstract: This paper describes a novel small wind turbine generation system with ring winding slotless PMSG. To reduce cogging torque, ring winding PM generator is used for a wind turbine generator. Using finite element analysis, the characteristics of slotless PMSGs are elucidated and the dynamic performance of the proposed system with MPPT control is represented. In this paper, the constant wind test and the quasi-natural wind test are conducted. The results of these tests indicate the proposed system has good performance, especially in starting phenomena. In addition, compared to conventional slotless PMSG, ring winding slotless PMSG achieves low copper loss.

Keywords: Permanent magnet synchronous generator, Slotless PMSG, Ring winding, Wind turbine generation system, Finite element analysis

1. ま え が き

化石燃料の枯渇，温室効果ガス排出量増大などに起因する環境問題や，新しい形態の独立分散型エネルギーシステムへの関心が高まっている中で，再生可能エネルギーとして風力の積極的な利用が望まれている．大型化が進む傾向にある風力発電だが，都市部や住宅地などにも未開の風資源は存在し，そこに着目した小型風力発電に関する研究や開発も進んできている¹⁾²⁾．近年では小型高效率，保守の簡易さなどの特徴に加え多極化が容易であることからダイレクトドライブ方式の永久磁石同期発電機 (PMSG) を風力発電機に利用することも多くなってきている⁵⁾が，一般に PM 発電機の特徴の一つであるコギングトルクの発生が風力発電システムの始動特性や発電特性に悪影響を及ぼすなどの側面も持っている．これまでに小型風力発電用にコギングトルク低減に向けて極弧率や磁石厚等の最適設計でコギングトルクを最小化する方法³⁾，コギングトルクを零とするために空芯コイルを用いた設計²⁾⁴⁾などが報告されているが，コギングトルクを零とするために風力発電機として環状巻スロットレス PMSG を採用し，ベクトル制御による可変速風力発電システムを構築した例は筆者の知る限りない．

本稿では，都市部での利用を目的とした独立分散型電源として，小容量風力発電システムを構成し，回転子は 12 極

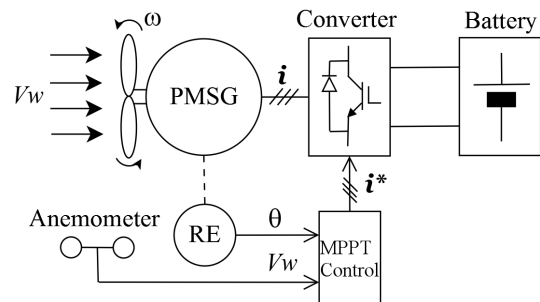


Fig. 1 Wind Turbine Generation System.

半磁化方式表面 PM 構造，固定子はスロットレス 18 コイルの環状巻線構造の PMSG に対して汎用の JMAG-Studio による電磁界解析と空気力学的特性に基づく風車モデリングによる回転系の運動方程式を 1 ステップごとに同時に解く連成解析を行い，風速を与えることで空間高調波や鉄心の磁気飽和を模擬した厳密な発電機モデルにおける風力発電システムのシミュレーションを行っている．まず，FEM 解析によって提案する発電機の基礎特性を明らかにした後に，コギングトルクが風力発電システムに与える影響の検証のために一定風速試験において従来のスロット PMSG⁵⁾ との特性比較を行い，最後に疑似自然風速試験による鼓状巻スロットレス PMSG⁶⁾ との発電量の比較検討により，本 PMSG の有用性を示している．

平成 23 年 7 月 21 日受付

*電気電子工学専攻電気システム工学コース修士課程

**電気システム工学部門

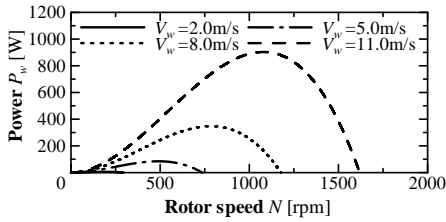


Fig. 2 Power Characteristics of Wind Turbine.

2. 風力発電システム

Fig.1 に本稿で用いた風力発電システムを示す．システムの構成は風車ブレード・発電機・PWM 整流器・風速センサ・エンコーダ・MPPT コントローラとなっている．発電された電力は蓄電池に貯められるとする．本システムは機械系，制御系，電気系の 3 つに大別することができ，以下第 3 章では機械系のモデリングとして空気力学的特性に基づく風車モデルおよびシステムの運動方程式に関して述べ，第 4 章では制御系モデルとして最大電力点追従制御方式および PMSG 速度制御システムに関して述べ，第 5 章では電気系モデルとして環状巻スロットレス PMSG・鼓状巻スロットレス PMSG・スロット PMSG および有限要素解析について述べる．

3. 風車機械系モデル

3.1 風車トルク

本稿では，風車に 2 枚羽根の高性能プロペラ風車を仮定した．一般にプロペラ風車の場合には風速 V_w における風車の平均風車出力トルクは周速比の関数で与えられるが，最も簡単な近似の方法の一つとして周速比の二次関数で平均風車出力トルク \bar{T}_w を与える方法がある⁸⁾．

$$\bar{T}_w = \frac{1}{2} \rho \pi R_w^3 (\alpha \lambda^2 + \beta \lambda + \gamma) V_w^2 \quad (1)$$

ここで， R_w :風車ブレード半径 [m]， ρ :空気密度 [kg/m^3]， α ， β ， γ :風車ブレードの形状・枚数・面積・ピッチ角で決まる定数， λ :周速比 ($= R_w \omega_w / V_w$)， ω_w :風車回転角速度 [rad/s]．

本稿における風車ブレード半径，各風車定数の設定値は $R_w=0.95\text{m}$ ， $\alpha=-0.00085$ ， $\beta=0.01241$ ， $\gamma=0.00055$ である．また，空気密度 $\rho=1.205\text{kg}/\text{m}^3$ としている．また，風車の特性としてウインドシア (風勾配) やタワーシャドウ効果，平滑効果等があり厳密な風車モデルにはこれらも考慮に入れる必要がある．ウインドシアは異なる 2 点間で風速・風向が異なる (風勾配がある) 風の状態であり，タワーシャドウ効果とはブレードとタワーが重なることにより生じる風の脈動である．これらを考慮した風車出力トルクは次式で与えられる¹⁰⁾¹¹⁾．ただし，今回は $A = 0.2$ ， $B = 0.4$ とした．

$$T_w = \bar{T}_w [1 + A \sin(\omega_m t) + B \sin(n_B \omega_m t)] \quad (2)$$

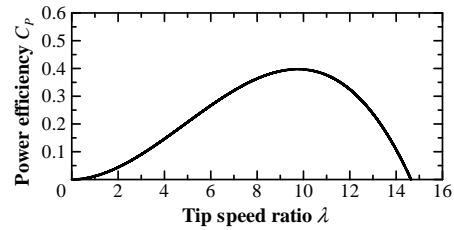


Fig. 3 Power versus Tip Speed Ratio Characteristic.

ただし， n_B :ブレード枚数， A, B :定数．

また，風速計で観測する風速変化のうち高周波成分は非常に局所的なものであるとされ，ブレードの表面全体で平滑化される特性も持っている．このことをモデリングするために風車に次式で示す 1 次遅れ特性を持たせた¹²⁾．今回はブレード半径等を考慮して風車が時定数 1.0 秒のローパス特性を持っているとした．

さらに，風車出力トルク T_w を用いて風車出力 P_{WTB} は次式で与えられる．

$$P_{WTB} = T_w \omega_w \quad (3)$$

(3) 式より得られる風車出力特性を Fig.2 に示す．

$$V_w = \frac{1}{1 + \tau_w s} V_{wp} \quad (4)$$

ただし， τ_w :時定数， V_{wp} :風速計で観測される風速．

3.2 運動方程式

この風力発電システムの運動方程式は次式のようなになる⁵⁾．

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_w - T_g - B\omega \quad (5)$$

ここで， T_g :発電機トルク [Nm]， J :風車-発電機系慣性モーメント ($= J_w + J_g \simeq J_w$) [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]， J_w :風車慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]， J_g :発電機慣性モーメント [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]， B :風車-発電機系摩擦定数 ($= B_w + B_g$) [$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$]， B_w :風車摩擦定数 [$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$]， B_g :発電機摩擦定数 [$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$]．それぞれの定数の値は， $J_w=0.312\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ， $B_w=0.002\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ， $B_g=0.002\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ である．

4. 制御系モデル

4.1 最大出力点追従制御

Fig.2 より風車出力には風速に応じて出力が最大になる回転数が存在し，その回転数に風車を制御する方式を最大出力追従制御 (MPPT 制御) と呼ぶ．この制御法は周速比を一定に保つように制御することから周速比一定制御とも呼ばれ本稿で用いた風車では周速比 $\lambda = 9.76$ に制御すれば出力効率が最大になることが Fig.3 からわかる．なお，MPPT 制御に用いる風速情報は風車特性を考慮して遮断周波数 1.0Hz のローパスフィルタを通じて検出するものと

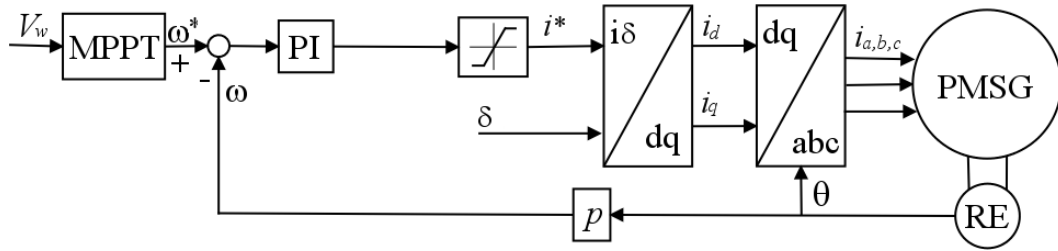


Fig. 4 Speed Control Diagram.

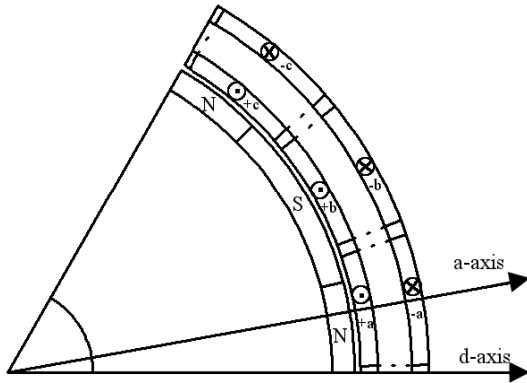


Fig. 5 Ring Winding Slotless PMSG Model.

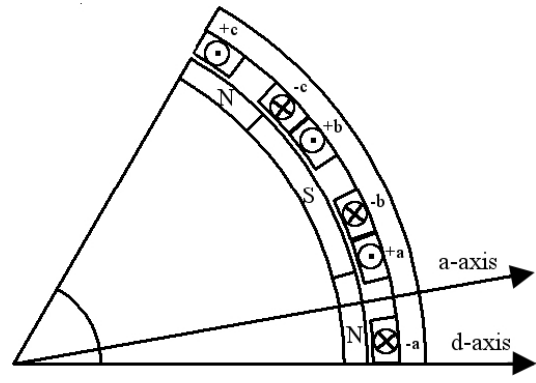


Fig. 6 Drum Winding Slotless PMSG Model.

する。

4.2 速度制御システム

提案する風力発電システムでは MPPT 制御を達成するために適切に速度制御を行う必要がある。本稿では速度偏差 $\omega^* - \omega$ を PI 補償し、電流指令値 i^* を定格電流に制限して生成、指定の内部相差角 δ に応じて i^* と δ から直軸電流 i_d および横軸電流 i_q を決定する。その後、dq 座標における電流指令値と回転子位置情報から三相電流 i_a, i_b, i_c に変換して PM 発電機の負荷電流を決定している。Fig.4 に速度制御システム図を示す。本稿では計算時間節約のために PWM 整流器のスイッチング動作は考慮せず理想的電流源(遅れなし、高調波なし)としている。

この速度制御システムでは PI 補償器を用いており、指令電流の生成にリミッタを用いているために積分の出力巻き上げによるいわゆるリセットwindアップ現象が生じる。これを避けるために本稿では、自動整合方式によるアンチwindアップ・バンプレス切替¹³⁾を行っている。

5. 発電機モデル

5.1 環状巻スロットレス PMSG

Fig.5 に環状巻スロットレス PM 発電機の 1/6 モデルを示す。回転子外径 122mm, 固定子鉄心厚 6mm, ギャップ長 1mm, PM 厚さ 4mm, 鉄心積厚 96mm である。固定子はコイル面積に対する導体断面積の割合を導体占積率と定義して導体占積率 65%, 厚さ 3mm の環状巻線を施し、回

転子 PM は半径磁化されており、スキューは行われていない。各巻線は非磁性体で構成される杭状のスペーサによって固定されるものとしている。電磁鋼板には 50A470 の磁気特性を、PM には残留磁束密度 1.026T, 保持力 9.98kOe の NdFeB 磁石を仮定している。また、発電機の仕様は 12 極 18 コイル, 定格容量 1.1kVA, 定格速度 1500rpm, 定格電流 8.5A としている。巻線巻回方向は固定子内側の導体が紙面手前に向かう方向、固定子外側の導体が紙面奥に向かう方向としており、各コイル 22 巻としており、条件を満たすために断面積 1.7mm^2 の導線を仮定している。電機子巻線抵抗の値は形状より 1 相当あたり 0.336Ω と計算された。

5.2 鼓状巻スロットレス PMSG

鼓状巻スロットレス PM 発電機の 1/6 モデルを Fig.6 に示す。回転子の構造寸法および発電機の材料が同一であるとし、固定子側は固定子外径 142mm, ギャップ長 1mm, 導体占積率 65% として、厚さ 4.5mm の鼓状巻線を施している。巻線巻回方向としては各相とも外向きに見て右回りの方向としており、各コイル 22 巻としており、条件を満たすために断面積 1.0mm^2 の導線を仮定している。環状巻の場合と同様にして形状からの計算により電機子巻線抵抗の値は 1 相当あたり 0.603Ω となった。

5.3 スロット PMSG

始動特性の検証に用いたスロット PMSG には筆者らが従来より使用してきた PMSG モデル⁵⁾を使用している。こ

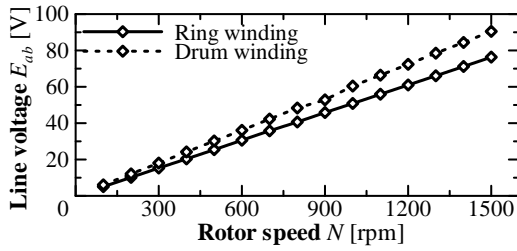


Fig. 7 Induced Voltage versus Rotor Speed.

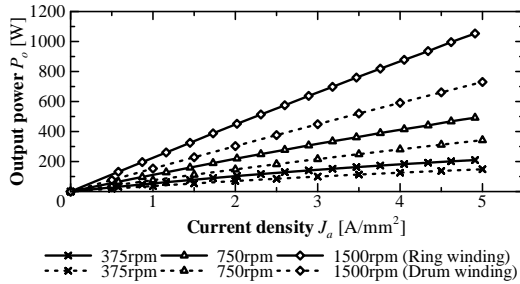


Fig. 8 Output Power versus Current Density.

の発電機は 8 極 12 スロット集中巻線，定格 1.3kW となっており，回転子は半径磁化されている。

5.4 有限要素解析

発電機の解析には汎用の磁界系有限要素解析ソフトウェア JMAG-Studio を用いた。発電機の対称性を考慮して全体の 1/6 モデルについて一次三角形要素を用いて環状巻モデルでは節点数 8612，要素数 12910 のメッシュ分割を，鼓状巻モデルでは節点数 8701，要素数 13107 のメッシュ分割を行った。2 次元有限要素解析を用いて角度変位および負荷電流を与えることで発電機トルクを求めている。なお，本解析では鉄心中の鉄損及び導体内に発生する渦電流損は無視している。

また，発電機基本特性として速度-無負荷誘起電圧特性，さらに負荷に制御電流源を仮定し，内部相差角 $\delta = -90^\circ$ とした際の電流密度-出力電力特性および電流密度-効率特性をそれぞれ Fig.7, Fig.8, Fig.9 に示す。

鼓状巻モデルの方が環状巻モデルに対して無負荷誘起電圧が大きくなっており電流密度に対する効率も高いことが分かる。しかしながら，環状巻モデルの方が鼓状巻モデルに対し電流密度に対する出力が大きく向上していることが分かる。これは，環状巻モデルの方が導体断面積の大きな導線を仮定しているため大きな電流が流せるためであると考えられる。

6. シミュレーション法

先に述べた有限要素解析による二次元の電磁界方程式およびシステムの運動方程式 (5) を同時に解く連成解析を行い，

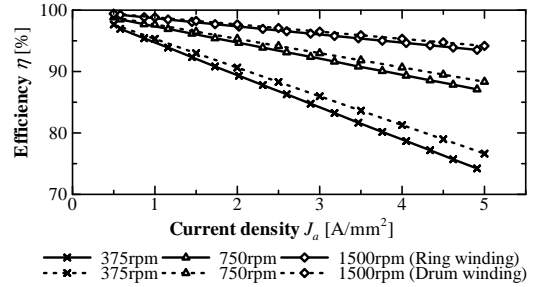


Fig. 9 Efficiency versus Current Density.

風力発電システムの動的なふるまいをシミュレーションしている。先述の速度制御系におけるサンプリングタイムは 1.0ms とし，電流指令も 1.0ms ごとに行っている。また，本稿では $i_d = 0$ 制御をおこなうために内部相差角 $\delta = -90^\circ$ として与えた。

風力発電システムに与える風速パターンとして 5.5m/s の一定風速および疑似乱数により作成した疑似自然風速を用いている。一定風速にてスロット PMSG とスロットレス PMSG の始動特性の比較を，疑似自然風速にて銅損を考慮した鼓状巻と環状巻の発電量比較を行った。

6.1 疑似自然風速

一般に風速は式 (6) に示すワイブル分布関数に従うとされている⁹⁾。疑似自然風速は簡単のため形状定数 $k = 2$ とした式 (7) で表わされるレイリー分布関数に従うレイリー乱数をサンプリングして得られるパルス列と 1 次バターワースフィルタを用いて作成されている。都市部で想定されるような複雑かつ比較的短い周期の突風性の風速変化を考慮して 5.0 秒周期の風速変化を模擬し，バターワースフィルタの時定数は 5.0 秒とした。疑似自然風速の風速パターンを Fig.10 に示す。

$$f(V_w) = \frac{k}{V_a} \left(\frac{V_w}{V_a} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V_w}{V_a} \right)^k \right] \quad (6)$$

$$f(V_w) = \frac{2}{V_a} \left(\frac{V_w}{V_a} \right) \exp \left[- \left(\frac{V_w}{V_a} \right)^2 \right] \quad (7)$$

ここで， V_a :平均風速 [m/s]。

7. 結 果

7.1 一定風速試験

まず，一定風速試験の結果を Fig.11 および Fig.12 に示す。Fig.11 では風車回転速度特性が示されている。Fig.11 よりスロット発電機が 38.1 秒で最適回転速度 (539.3rpm) に達しているのに対し，環状巻スロットレス PMSG では 23.0 秒で最適回転数に達している。鼓状巻スロットレス PMSG についてもほぼ同時刻に立ち上がる結果となった。これは，

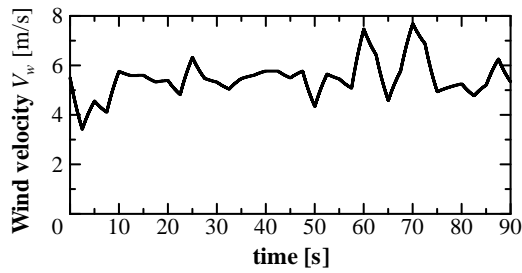


Fig. 10 Quasi-Natural Wind Pattern.

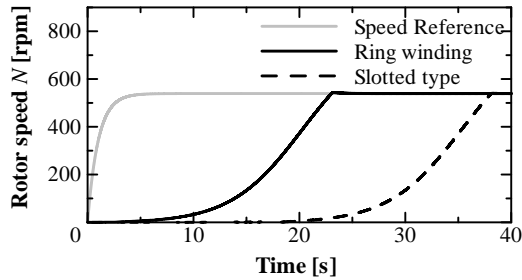


Fig. 11 Rotor Speed Response.

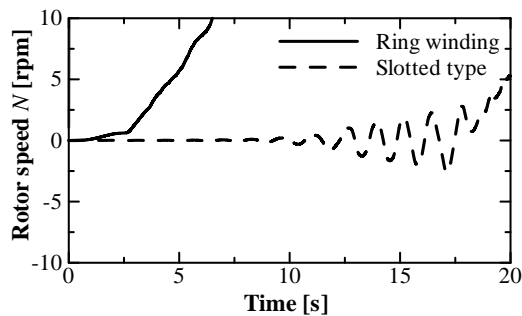


Fig. 12 Starting Characteristic.

発電機のコギングトルクによる影響が原因であり始動トルクの小さなプロペラ風車および都市部のような風速が特に不規則・弱く起動停止を繰り返すことが多いといった条件下では非常に重要な特性の一つであると言える。また、発電開始後はアンチwindアップコントローラを利用したためほとんどオーバーシュートがなく最適回転速度に風車回転速度を追従させることを達成している。同図より、コギングトルクが速度制御に与える影響がないことも明らかである。

Fig.12にはFig.11に示す風車回転速度特性のうち0秒から20秒の部分拡大した始動特性を示す。環状巻スロットレス PMSG では風速が与えられると同時に風車回転数が増大しているのに対して、スロット PMSG ではコギングトルクの影響で18秒付近まで正負に回転数が振動し立ち上がりに時間がかかる様子が分かる。

一定風速試験の結果より、コギングトルクの有無が風力発電システムの始動特性に与える影響が明らかになり、シ

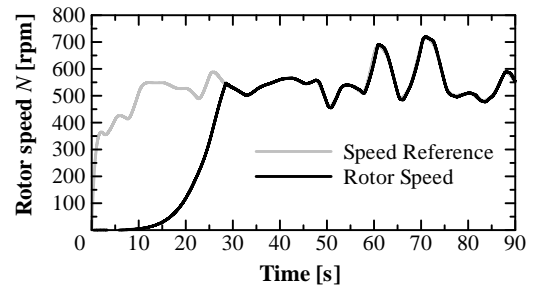


Fig. 13 Rotor Speed Response (Ring winding).

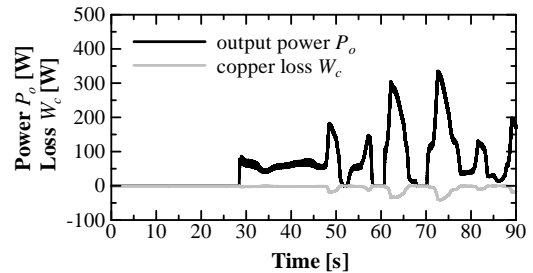


Fig. 14 Output Power and Copper Loss (Ring winding).

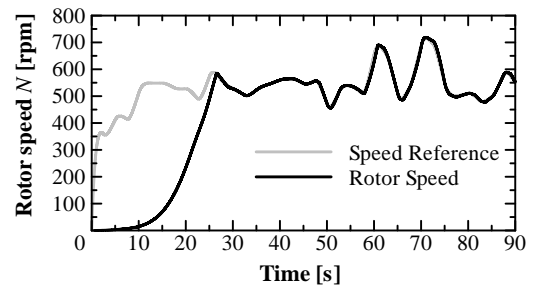


Fig. 15 Rotor Speed Response (Drum winding).

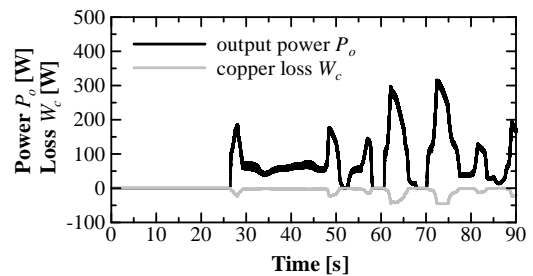


Fig. 16 Output Power and Copper Loss (Drum winding).

ステムの立ち上がり時間という点で起動停止を繰り返すような状況下でスロットレス PMSG が有利であるということが明らかになった。

7.2 疑似自然風速試験

本節では、疑似自然風速試験の結果を示す。Fig.13には環状巻スロットレス PMSG 風力発電システムの風車速度特

Table 1 Results of Quasi-Natural Wind Test (30s~90s).

	Ring winding	Drum winding
Generated Energy [Wh]	1.42	1.41
Loss Energy [J]	389	485
Average Power [W]	85.4	84.5
Average Copper Loss [W]	6.48	8.09

性を示す．おおよそ 28 秒で最適回転数に達し，最大電力を得るための最適回転速度を良く追従しており，MPPT 制御を達成している．Fig.14 には環状巻スロットレス PMSG 風力発電システムの発電電力，銅損の動特性を示す．最適回転数に達する 28 秒付近で発電機出力が急峻に立ち上がり，その後風車速度が最適回転数を下回らない限り銅損を伴いながら発電を行う様子が分かる．また，Fig.15 には鼓状巻スロットレス PMSG 風力発電システムの風車速度特性を示す．立ち上がりの時間が環状巻スロットレス PMSG とは 2 秒程度ずれてしまっている．この差は有限要素解析における要素数を増やしていくことでほぼ零になると考えられる．しかし，要素数を増やすことで解析時間も増大するため実用的にシミュレーションを行うための要素分割は今後の課題としたい．Fig.13，Fig.15 より両モデルとも MPPT 制御が達成されている．Fig.16 には鼓状巻スロットレス PMSG 風力発電システムの発電電力，銅損を示す．環状巻モデルと異なり，おおよそ 62 秒からと 72 秒からの 2 回ほど電流リミッタにより出力電流が制限される様子が分かる．

Table 1 には風力発電システムが起動した状態 (30 秒経過後から 90 秒まで) での発電電力量・銅損エネルギー・平均発電電力・平均銅損を示す．発電電力量はわずかに環状巻モデルの方が大きくなり，銅損による損失エネルギーは鼓状巻モデルの方が大きくなる結果となった．

疑似自然風速試験の結果より銅損を考慮した場合，同一体格のスロットレス PMSG では環状巻の方が有利になることが明らかになった．

8. む す び

以上，環状巻スロットレス PMSG を用いた小型風力発電システムの有限要素シミュレーションを報告した．有限要素解析と運動方程式の連成により提案システムの動特性を明らかにした．まず，実用的な風速の範囲で十分に MPPT 制御が可能であることが確認された．また，スロット PMSG と比較して格段に始動特性が向上することも明らかになった．さらに，同一体格の鼓状巻スロットレス PMSG と比較して銅損の面で有利になることも確認された．これらの結果として環状巻スロットレス PMSG 小型風力発電システムは都市部での発電のような比較的風速が弱く不規則な条件での発電に適していることが明らかになった．

この環状巻スロットレス PMSG は出力密度向上に効果的であると考えられるデュアルロータ構造¹⁴⁾にも適した構造であるため，今後さらなる出力・効率向上のためにデュアルロータ型環状巻スロットレス PMSG についても解析を進めていく予定である．

参 考 文 献

- 1) 佐藤，吉田，嶋田: "都市型風力発電システムの実用化開発"，電学論 D，Vol.125，No.11，pp.1016-1021 (2005)．
- 2) 高橋，安田，大本，原: "都市部における小型風力発電に適したラジアル型コアレス発電機の提案と試作"，電学論 B，Vol.127，No.4，pp.589-595 (2007)．
- 3) Jang-Young Choi, Seok-Myeong Jang, Beyong-Mun Song, "Design of a Direct-Coupled Radial-Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbines", IEEE Power and Energy Society General Meeting (2010)．
- 4) Johannes Abraham Stegman, Martrten J. Kamper, "Design Aspects of Double-Sided Rotor Radial Flux Air-Cored Permanent-Magnet Wind Generator", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 47, No. 2, pp.767-778 (2011)．
- 5) 袈裟丸，大野，園田: "PMSG を用いた小型風力発電システムの FEM シミュレーション"，電学論 D，Vol.128，No.1，pp.83-84 (2008)．
- 6) 徳永，袈裟丸: "小容量風力発電用スロットレス PMSG の磁化方式による特性比較"，電学全大講演論文集，Vol.7，pp.122-123 (2011)．
- 7) D.G.Dorrel, Min-Fu Hsieh, "Issues with Low Speed Direct-Drive Permanent-Magnet Generator Design—Comparison of Radial-Flux Slotted and Torus Machines", IEEE IECON, pp.3091-3096 (2010)．
- 8) 鈴木，鎌野，伏見，原田: "風車シミュレータ"，計測自動制御学会論文集，Vol.24，No.9，pp.68-74 (1988)．
- 9) 牛山: "風車工学入門"，森北出版，p.34-40 (2002)．
- 10) Luiz A.C.Lopes, Josselin Lhuillier, Avishek Mukherjee, Mohammad F.Khokhar, "A Wind Turbine Emulator that Represents the Dynamics of the Wind Turbine Rotor and Drive Train", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.2092-2097 (2005)．
- 11) 内藤，佐藤，八木橋，徳永: "タワーシャドー効果を用いた風力発電機の運転状態判定法"，電学論 B，Vol.122，No.9，pp.1003-1009 (2002)．
- 12) J.G.Slootweg, H.Polinder, W.L.Kling, "Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.18, No.4, pp.516-524 (2003)．
- 13) Longya Xu, Shengming Li, "Torque Control Patching and Ant-Windup and Bumpless Transfer Conditioning of Current Regulators for High-Speed PMSM Systems", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.1679-1682 (2001)．
- 14) Ronghai Qu, Thomas A. Lipo, "Dual-rotor, Radial-Flux, Troidally Wound, Permanent-Magnet Machines", IEEE Trans. Industry Application, Vol. 39, No.6, pp.1665-1673 (2003)．