

風力発電用永久磁石同期発電機

Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind-Power Generation

真下 明秀 MASHIMO Akihide

星 昌博 HOSHI Masahiro

梅田 望緒 UMEMA Mio

再生可能エネルギーへの注目が集まる中、風力発電分野においても世界的に市場が伸長している。富士電機では、風力発電の高効率運用を目指した風力発電装置の製品化を進めている。発電機には永久磁石同期発電機を採用しており、国内最大級の3,000 kW級試作機の製作、検証を完了した。ダイレクト駆動方式の風力発電システムに適用する低速の発電機である。軽量化、耐環境性および多台数生産に適した構造を実現するための新しい技術を盛り込んでいる。試作機の検証結果は良好であり、風力発電機としての性能を十分に満たしていることを確認した。

Amid the attention on renewable energy, the market for wind-power generation is expanding on a global scale. At Fuji Electric, we are pushing forward the commercialization of wind-power generation equipment with the aim of achieving highly efficient operation of wind-power plants. We recently completed production and testing of a prototype 3,000 kW permanent magnet synchronous generator, which is the largest class in Japan. This is a low-speed generator for use in direct drive wind-power generation systems. The device incorporates new technology to achieve a suitable structure for weight-reduction, environmental resistance and multi-unit production.

We have obtained favorable prototype test results, and verified that the device sufficiently meets the functional requirements for a wind-power generator.

1 まえがき

再生可能エネルギーへの注目が集まる中、富士電機では高効率運用が可能な風力発電装置の製品化を進めている。発電機には永久磁石同期発電機を採用しており、このたび国内最大級の3,000 kW級発電機の試作、検証を完了した。本発電機は、ダイレクト駆動方式の風力発電システムに適用する低速の発電機であり、開発に当たっては各種の解析技術を駆使して新しい技術を盛り込んでいる。検証結果は設計通りで、風力発電機としての性能を十分満たすことを確認している。本稿では、開発した風力用永久磁石同期発電機の主要技術について述べる。

2 開発の方針と適用システム

図1に、巻線形誘導発電機によるダブルフェド方式および永久磁石同期発電機によるダイレクト駆動方式のシステム概要を示す。

増速ギヤを用いる発電システムでは巻線形誘導発電機が主流であり、かご形誘導発電機を用いる方法もある。巻線形誘導発電機を用いるものはダブルフェド方式と呼ばれ、励磁容量分の電力変換器を用いて回転子側電流周波数をコントロールすることで、風車の回転数が変わっても一定周波数の発電が可能なシステムである(図1(a))。この方式の発電システムは発電機を小型化することができるという利点がある半面、増速ギヤのトラブルやメンテナンスが多いという欠点がある。

一方、ダイレクト駆動方式の発電システムは発電機が大型化する反面、増速ギヤを必要としないためトラブルやメンテナンスを減らすことができ、さらに騒音が小さいという利点がある(図1(b))。発電機には、永久磁石同期発電

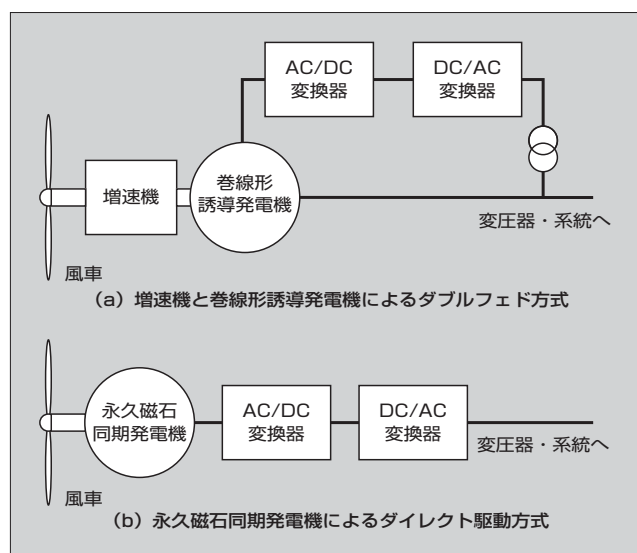


図1 風力発電システムの概要

機や通常の同期発電機を用いる場合がほとんどである。風車の回転数の変動に応じて発電機の出力電力の周波数が変動するので、発電容量分の電力変換器(フルコンバータ)が必要となる。一方、フルコンバータを介して電力を供給するため、広い風速の範囲への対応が可能であり、特に低風速領域での発電効率が向上する⁽²⁾など運用面での利点が多い。風力発電機は一つの発電サイトに多くの台数が設置されることが多い。そのため大型の発電機を効率良く生産できるように、今回の開発では生産性も考慮した構造を採用している。風力発電機に適した性能を得るために、次に示す方針で開発を進めた。

- (a) 多台数生産に適した構造の採用
- (b) 陸上輸送を考慮した外形寸法の縮小と軽量化
- (c) 耐環境性を考慮した絶縁構造

3 試作機の仕様と構造

3.1 試作機の仕様

試作機の外観を図2に、仕様を表1に示す。出力は国内最大級の3,000kW級とし、回転数はこのクラスの風車の一般的な回転速度を想定して 15 min^{-1} とした。また、工場内で試験が行えるように回転軸構造を採用し、駆動機に直結できる構造とした。なお、実際の風車との結合を想定した構造で周辺構造の基本設計を行い、そこから試作機の構造へ落とし込みを行っている。冷却は外皮および機内の空冷としており、外皮にはフィンを装着し、風車に直結して屋外に配置することを想定した。なお、試作機の全体質量は大幅な軽量化の結果75tで仕上がった。一般に回転電気機械の大きさは、そのトルクの大きさに比例するが、トルク当たりの質量としては水車発電機と比較して一桁少ない数値である。

3.2 試作機の構造

開発方針に沿って軽量化および生産性の向上を図り、次に示す特徴的な構造を採用した。

(1) 固定子の構造

固定子の外形は直径4mを超えるため、次工程に進むまでの間、広いスペースに大きな部品が居座ることとなり、生産効率が悪くなる懸念があった。これを解消するために、固定子は分割鉄心とし、鉄心と巻線は分割した単位ごとに組み立てを進め、最後に分割鉄心を固定子枠（フレーム）

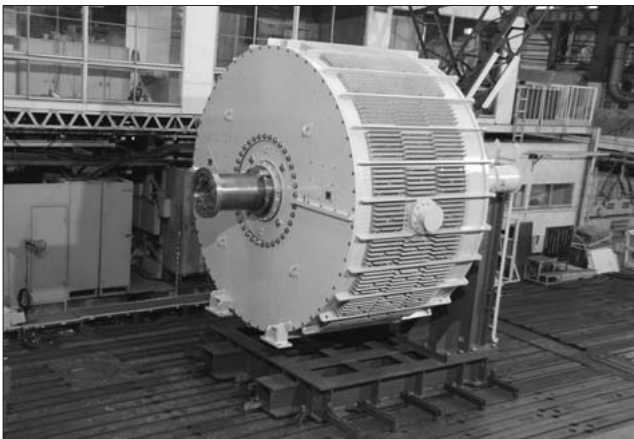


図2 風力発電用3,000kW永久磁石同期発電機試作機

表1 風力発電用3,000kW永久磁石同期発電機試作機の仕様

項目	仕様
出力	3,000kW
回転数	15 min^{-1}
電圧	690V
効率	94.7%
冷却方式	外皮+機内空冷
温度上昇	Fクラス (IEC60034-1)

の内径に装着して円筒状の固定子に組み立てる製作方法を採用した。分割鉄心構造は、水車発電機など大口径の発電機では一般的に採用される方式である。巻線の幅（ピッチ）が広く、異なる分割鉄心に巻線がまたがるため、一部の巻線の挿入は鉄心を組み立てた後に行う。

試作機では、巻線に次に説明する集中巻き方式を採用することで、全ての巻線を鉄心に組み込んだ状態とし、完全に鉄心の分割単位で扱えるようになっている。図3に、鉄心の分割とコイルの関係を示す。

(2) 巻線の構造

前項で一部触れたが、固定子巻線に採用している集中巻き方式は、サーボモータなどの小型回転機ではよく採用される方式である。通常、素線にはエナメル被覆の丸線を用いることが多い。

本試作機は、大容量機であるので平角銅線を用いて集中巻きを行った。図4に示すように、従来の分布巻きでは巻線のピッチが広く、亀甲巻きとなるため固定子鉄心から突き出ているコイルエンドの部分で余分な損失（銅損）が発生している。一方、集中巻きではコイルエンドの寸法を短

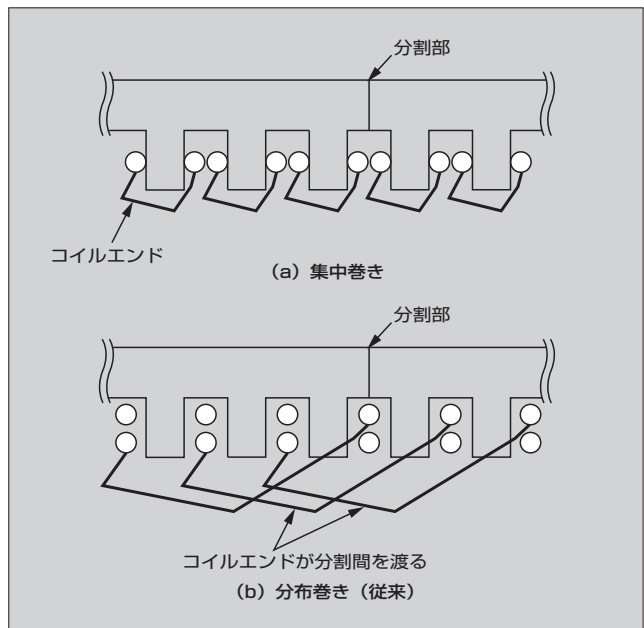


図3 鉄心の分割とコイルの関係

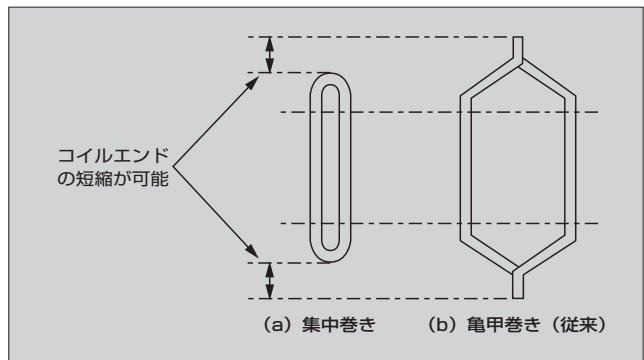


図4 巻線の比較

かくできるため、発電機全長の短縮およびコイルエンドで発生する銅損が低減できる。分布巻きに対して、固定子鉄心の長さを同一にした場合、全長を 150 mm 程度短縮する効果があり、損失は約 6% 低減できるという試算結果が得られている。

(3) 回転子の構造

回転子の構造は、回転子の表面に永久磁石を取り付けた、いわゆる SPM (Surface Permanent Magnet) 構造である。永久磁石には、エネルギー積の高いネオジウム-鉄-ボロン系の焼結磁石を用いている。着磁後に回転子に装着する際に、大きな吸引力によって作業性が著しく低下する。これを改善するために、鉄製の磁極座に無着磁の磁石を複数個取り付けて一つの磁極を組み立てて構成し、その磁極単位で着磁を行った後に回転子に装着する方法を採用した。この方法を用いると、着磁後の磁束は、磁石表面から空中に出たのち磁性材料である磁極座を介して反対側の面に渡る回路を通る。このため、着磁された磁石を直接回転子に装着するよりも回転子に回る磁束量が減少して吸引力が低減し、結果として作業性が向上する。図 5 に示すように万が一磁石が割れても飛散しないように、磁極の外皮をステンレス鋼板のカバーで覆っている。この磁極を回転子の軸方向に複数連ねて発電機の 1 極分を構成している。

また、永久磁石機で発生する特徴的なトルク脈動として、磁石と鉄心の間で起こるコギングトルクがある。その対策として 1 極中の各磁極を所定の角度にずらして配置 (スキュー) することでコギングトルクを低減させた。電磁界解析により、コギングトルクは定格トルクに比べて十分低く問題のないことを確認している。

(4) 軽量化のための構造検討

発電機を軽量化するため、有限要素法による構造設計を行って各部の形状を決定した。解析の一例として、風車の荷重に対する回転子の変形の解析結果を図 6 に示す。

解析に用いた形状は、風車への設置状態を踏まえて固定軸を前提とした構造であり、試作機とは構造が異なる。回転子の表面には磁石が存在するため、固定子との間 (ギャップ) には吸引力が常に作用している。ギャップの



図 5 回転子磁極 (カバー装着状態)

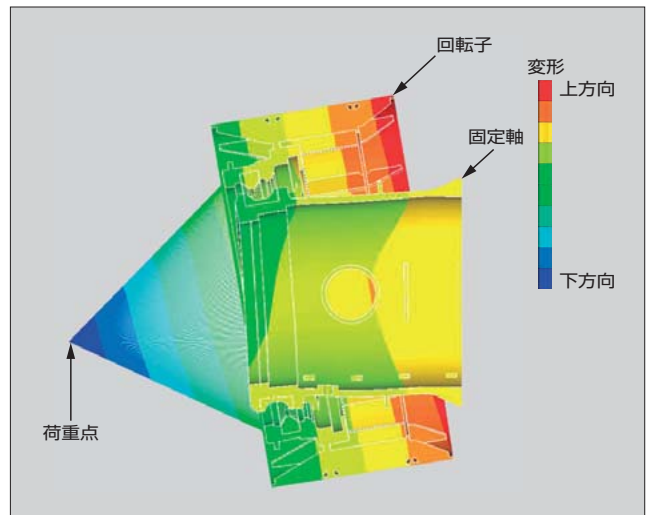


図 6 固定軸モデルによる回転子の変形解析の結果

変動があると吸引力も変化するため、変形による吸引力の変化を考慮した解析を行っている。これらの解析結果を用いて軽量化に向けた構造の最適化を行った。

3.3 通風・冷却構造

冷却性能の向上は小型化に大きく寄与するため、試作機の冷却方法も工夫している。

ダイレクト駆動の発電機は、ハブとの間にギヤユニットが存在しないので、ナセル内に設置する必要がない。このため風車を通過した風を、発電機の外皮を冷やす冷却風として利用できる。しかし、外皮冷却の場合、主発熱部である巻線から放熱部である外皮までの間にある鉄心や構造部材によって熱抵抗が高くなるため、コイル近傍で冷却する内気循環空冷に比べると冷却性能がやや劣る。このため試作機では、外皮空冷をメインとしながら発電機の内部への通風も同時に行うハイブリッド冷却とすることで、冷却性能の向上を図った。冷却構造を図 7 に示す。

外皮にはフィンを設け、発電機内部の空気は空隙部と鉄

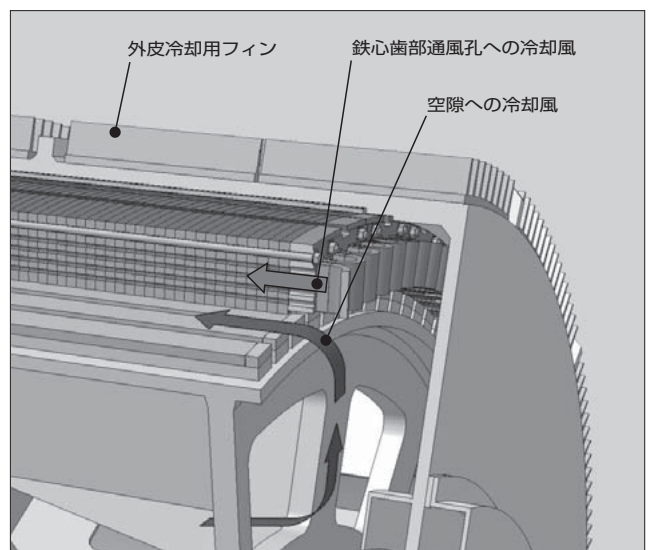


図 7 冷却風の流路

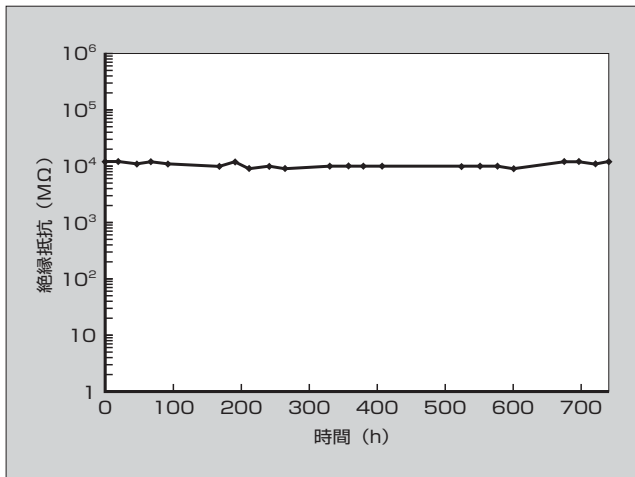


図8 絶縁抵抗—時間特性 (水没試験結果)

心内に設けた通風孔を通す流路とした。冷却効果は熱流体解析を用いて設計段階で確認したとおり、一般的な外皮空冷方式の回転機に対して1.5～2倍に近いトルク密度(体積当たりのトルク)が得られている。

3.4 絶縁性能

本試作機の定格電圧は690Vであるが、PWM(Pulse Width Modulation)制御の電力変換器を介して系統に接続するため、電力変換器の直流中間電圧とパルス給電により発生するサージ電圧を考慮して、より高い電圧に対する絶縁仕様とする必要がある。直流中間電圧は1,150Vとなり、これにサージ電圧も考慮すると最大で2倍の電圧になるため、2,300Vの絶縁耐圧が必要になる。

風力発電機は、設置場所が地上から離れた高所にあるため故障が生じても修理することが容易でないため、信頼性の高い絶縁システムが必要である。また、海岸近傍や森林付近など結露が生じやすい環境に設置されることも多く、耐湿性の高いシステムが求められる。

耐環境性絶縁として、これまで実績のある全含浸絶縁を採用した。この絶縁の耐水性を確認するために水没試験による検証を実施した。水没試験には固定子を分割した鉄心付きモデルを使用し、コイルを複数個接続して、相間の渡り配線絶縁も模擬できる構造となっている。試験の結果、図8に示すように、1か月にわたり水没させても絶縁抵抗の低下は生じなかった。

4 試作機の試験結果

試作機について、発電機単体試験および電力変換器との組合せ試験を実施した。図9に組合せ試験状況を示す。

試験結果は、単体試験も組合せ試験もそれぞれ良好であり、設計通りの性能が得られていることを確認した。特に、大型発電機として初めて採用した集中巻き巻線と分割鉄心構造による固定子の絶縁性能は、耐電圧試験の2,380V(定格電圧690V×2+1,000V)に余裕を持って耐え、絶縁性能に関して問題のないことを確認した。

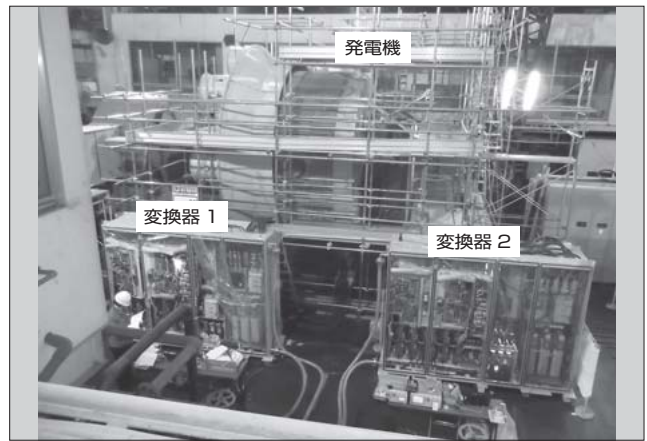


図9 組合せ試験状況

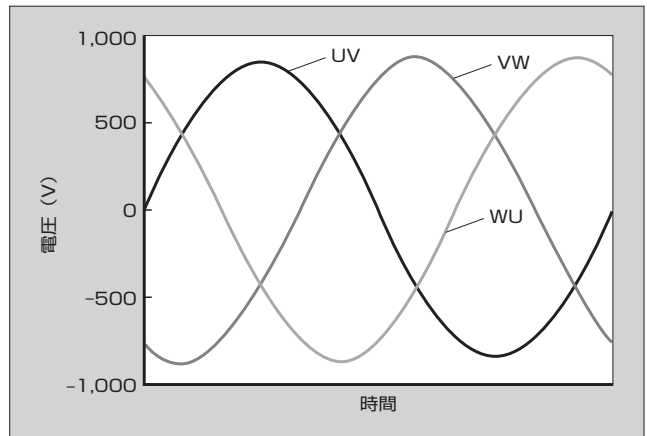


図10 無負荷誘起電圧

温度上昇試験の結果、巻線の温度上昇は十分に規格値内に収まった。また、騒音測定の結果は80dB以下の目標仕様を満たしており、低速発電機ゆへの低騒音化を確認することができた。図10に無負荷誘起電圧の波形を示す。振動の要因となるひずみの少ない波形が得られた。

5 あとがき

このたび開発した風力用永久磁石同期発電機は、2013年度に量産機の市場供給を計画している。現在は、これに向けて量産化のための各種検討を進めている。

風力発電分野は今後の市場拡大が期待されており、現在発電機の洋上設置に向けた検討が国内各所で行われている。陸上よりも設置費用が掛かる洋上発電においては、発電単価を低減するために発電機の大容量化が求められている。今後、さらなる大容量発電機の開発に力を入れていく所存である。

参考文献

- (1) 真下明秀ほか. 回転機の最新技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.3, p.207-211.
- (2) 木村守. 大容量風力発電用発電機の特長比較. 電気学会誌. 2009, vol.129, no.5, p.288-290.



真下 明秀

回転機の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所回転機技術開発部主任。電気学会会員。



梅田 望緒

大型回転機の開発，設計に従事。現在，富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部川崎工場回転機部。



星 昌博

大型回転機の開発，設計に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所回転機技術開発部主任。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。