

風力発電用永久磁石式発電機の開発

🔊 風力発電，永久磁石

* 武井知巳 Tomomi Takei

* 太田伸也 Shinya Ota

概要

風力発電用永久磁石式発電機（PMG：Permanent Magnet Generator）は，回転子に永久磁石を使用した多極の低速機であり，風車に直結して運転でき，メンテナンス性にも優れているといった特長を有する。本PMGの開発にあたり，最適な磁石の選定，各部温度検討を行い，運転中の外力や磁力によるPMGの変形をFEM（Finite Element Method）解析手法により検討した。また，実負荷試験により電気的特性などを測定し，仕様上問題無いことを確認した。



風力発電用PMG

1. ま え が き

近年の地球温暖化問題の高まりから，CO₂排出の無い自然エネルギーの活用が注目されている。自然エネルギーとしては太陽光と並んで風力が一般的であり，全世界で風力発電所の新規建設及び出力アップが進められ，今後の電力供給に果たす役割が期待されている。このような状況の中で，当社では永久磁石を使用した風力発電用永久磁石式発電機（PMG：Permanent Magnet Generator）を開発し，2009年に1号機を製造出荷した。

本稿では，今回開発したPMGの構造・特長及び開発における検討・検証事項について紹介する。

2. 風力発電用PMGの構造・特長

第1図に今回開発した風力発電用PMGの外観を，第2図に構造断面図を，第1表に定格事項を

示す。

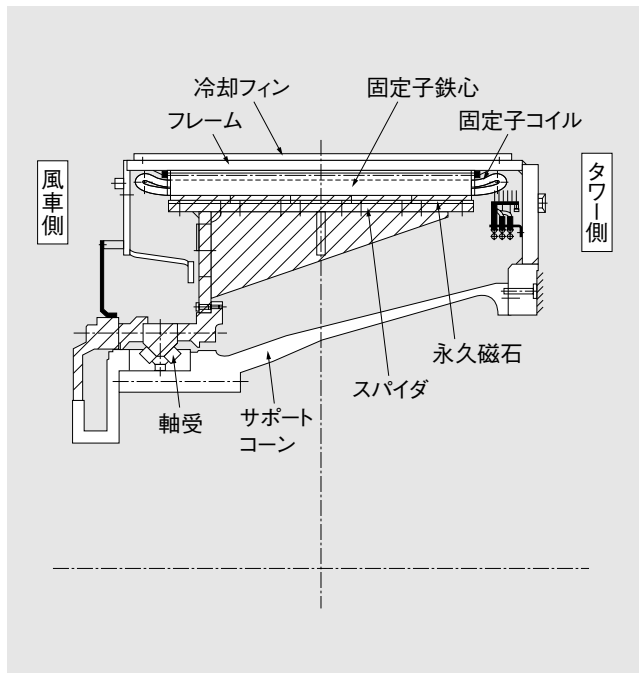
本PMGは風車と直結構造とするため風車の回転数に合わせた低速回転の発電機となっている。ま



第1図 風力発電用PMG外観

多極の三相PMG。風車の回転数に合わせた低速機であり，風車に直結して使用できるため，増速機を必要としない。

*回転機システム工場



第2図 風力発電用PMG構造断面図

固定子フレーム内に固定子鉄心と巻線が配置され、回転子表面に磁石を取り付けている。フレーム外面の冷却フィンで冷却を行う外被冷却構造である。

第1表 風力発電用PMG定格事項

定格事項を示す。

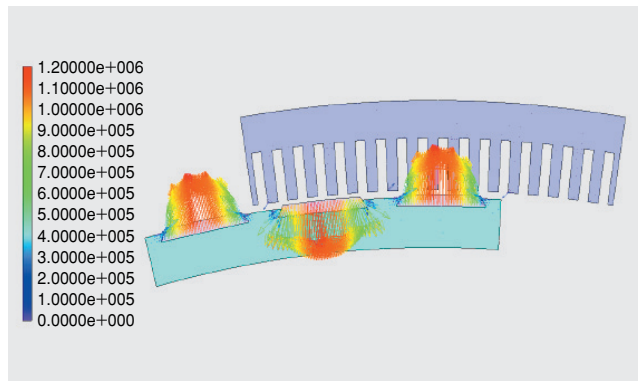
項目	仕様
定格出力	2281kVA
定格電圧	660V
定格周波数	9.5Hz
力率	0.925 (進み)
極数	60
耐熱クラス	155 (F)
効率	95.0%
適用規格	IEC 60034-1
設計寿命	20年以上

た、風車と回転子の荷重を共通の軸受で支える1軸受構造を採用している。

固定子は円筒形のフレーム内部に鉄心及びコイルが取り付けられており、フレーム外表面に冷却フィンを設けた外被表面冷却構造である。

回転子は円筒形状のスパイダの表面に永久磁石を取り付けた単純な構造となっている。界磁巻線が無いので、回転子への励磁電流の供給用のスリップリングやブラシが不要であり、メンテナンス性に優れている。

先に述べたように、本PMGは風車と直結構造のため増速機が不要であり、機械的な騒音源である増速ギヤが無いので、騒音の面でも有利である。



第3図 三相突発短絡時の反磁界

短絡瞬時の反磁界の大きさを磁界解析により求めた。磁石の選定に重要な特性である。

3. PMG開発における検討・検証事項

3.1 磁石の選定

(1) 不可逆減磁 本PMGにはネオジウム・鉄・ボロン (NdFeB) 系の永久磁石を採用した。永久磁石を扱う上で避けて通ることができない事項として減磁がある。永久磁石には可逆減磁と不可逆減磁があるが、特に風力発電機はタワー上に設置されるため、その運用期間中に、不可逆減磁を起こすようなことがあってはならない。不可逆減磁を起こす要因として、磁石が高温下にさらされることによる減磁と外部磁界による減磁がある。前者は負荷運転時の機内及び磁石自身の温度上昇によるもので、後者は短絡事故時の短絡電流に起因した反磁界によるものである。

(2) 減磁検討 PMGには短絡事故において十分耐えられる強度が要求される。また、短絡電流による反磁界で減磁するようなことがあってはならない。

磁石の磁化特性には、ある磁界の強さで急激に折れ曲がる変曲点があり、これをクニック点と呼ぶ。反磁界の強さがこのクニック点を越えた場合、磁石は不可逆減磁を起こす。

PMG短絡時の反磁界は第3図に示すように磁界解析で求め、負荷運転時の磁石温度で短絡が生じてても、反磁界を上回るようなクニック点を持つ高保持力のネオジウム磁石を採用した。

3.2 PMGの特性算定

PMGの特性算定は、FEM (Finite Element Method) により磁界解析を行い無負荷誘起電圧、三相短絡電流、インダクタンス算定を行い、負荷

特性は式(1)~(4)の等価回路方程式で算定した。

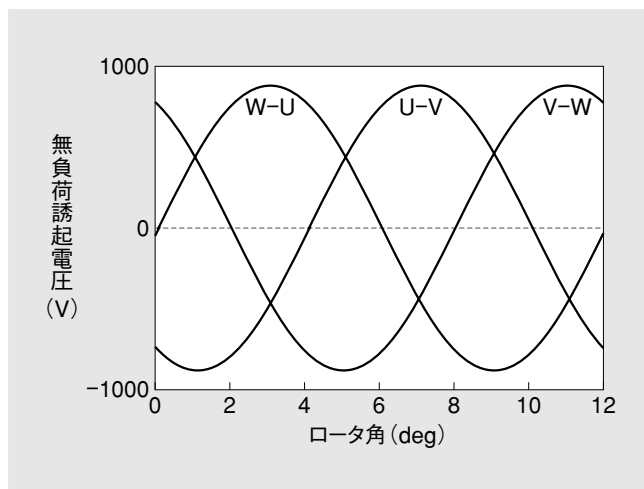
$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega Lq \\ \omega Ld & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

$$I = \sqrt{\frac{id^2 + iq^2}{3}} \quad \dots\dots(2)$$

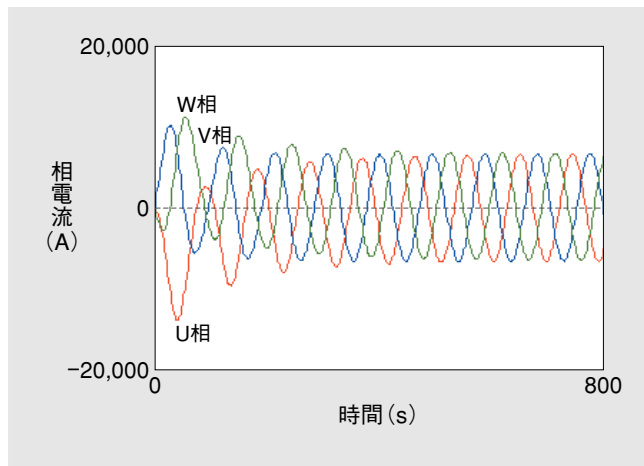
$$V = \sqrt{Vd^2 + Vq^2} \quad \dots\dots(3)$$

$$T = -\frac{P}{2} (\lambda iq + (Ld - Lq) id iq) \quad \dots\dots(4)$$

V：発電機電圧 I：発電機電流
 Vd, Vq：d軸, q軸電圧
 Id, Iq：d軸, q軸電流
 Ld, Lq：d軸, q軸インダクタンス
 R：電機子抵抗, P：極数, ω：角速度
 T：トルク, λ：電機子鎖交磁束



第4図 無負荷誘起電圧波形
 FEM磁界解析により基本特性である無負荷誘起電圧波形を求めた。ひずみの少ない正弦波となっている。



第5図 三相突発短絡電流
 FEM磁界解析により基本特性である三相突発短絡電流を求めた。

第4図に無負荷誘起電圧波形を、第5図に三相突発短絡時の電流波形を示す。

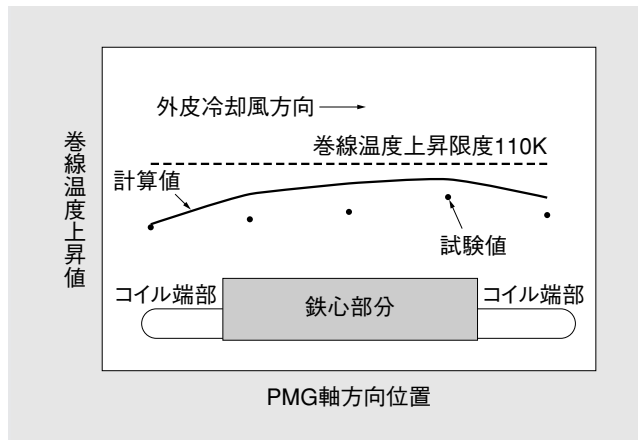
3.3 PMGの温度計算

(1) 温度計算手法 風力発電用PMGはタワー上に設置され、フレーム表面には冷却フィンが取り付けられ、外部空気による外被表面冷却とエアダクトからPMG内部への強制通風を行い、回転子の回転により内部空気のかくはんを行い冷却する。

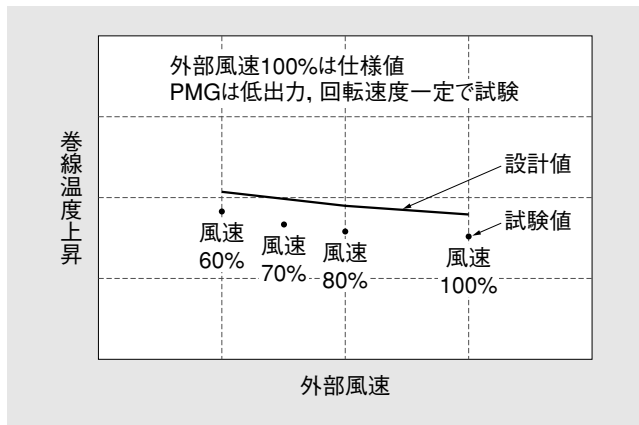
比較的単純な構造であるため、通風・温度計算は通風及び熱回路網から節点法により各部温度を算定した。計算精度を上げるためには、この等価熱回路網をより実機に近づけることが重要となるが、例えば製造過程で想定される、フィンとフレーム間、フレームと固定子鉄心間、コイルと鉄心間などのわずかなすきまを回路上の熱抵抗として展開した。

第6図にPMG軸方向でみた温度分布の計算結果と温度試験結果を示す。PMG内部の温度勾配は外被の冷却風の向きに沿って上昇し、計算値と同様の傾向を示している。また、各部温度上昇値については計算値が若干高めている。これは熱回路の熱抵抗には製造誤差を想定した抵抗値を使用しているが、実機では想定より小さめになっていることを意味する。

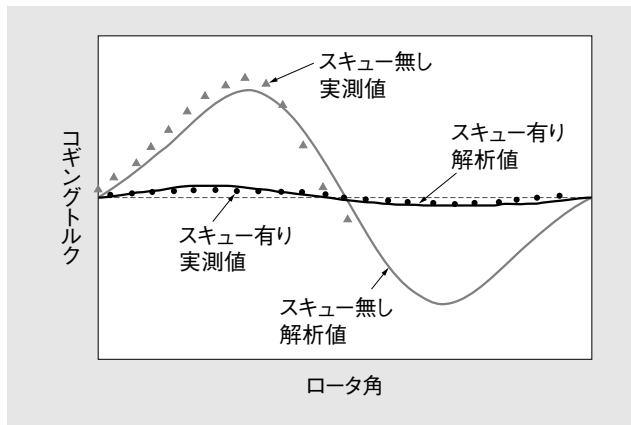
(2) 外被冷却風速の影響 次にPMGの冷却は外被表面の風速に左右されるが、PMG温度に与える影響を確認するため、PMG出力を低めに設定した試験で、冷却風速を変化させ計算値と実測の比較を行った。第7図のように、計算値、実測値共に同じ傾向を示していることを確認した。



第6図 PMG固定子巻線温度分布
 PMG軸方向温度分布は計算値・実測値とも同じ傾向を示している。温度の差異は想定値と実機の違いによる。



第7図 風速と巻線温度上昇
 風速の変化に伴い、計算値・実測値とも同じ傾向を示している。



第8図 コギングトルク
 スキューによってコギングトルクが解析値通り低減できることを確認した。

(3) 短絡事故時の温度 回転子に界磁巻線を持つ発電機と異なり、永久磁石を使用している本PMGは回転している限り誘導電圧をゼロにできない。従って、短絡事故時は風車の回転が停止するまで短絡電流が流れ続けることになる。しかし、本PMGは大形且つ低速機であり、熱時定数が非常に大きいため、各部温度が飽和に達する時間は10時間程度と比較的長い。その一方、風車停止指令開始から停止までは数十秒であるため、熱的に問題となることはない。

3.4 コギングトルク

一般的に永久磁石を持つPMモータではコギングトルクが重要な設計要素となる。このコギングトルクは、例えば産業用サーボモータでは位置決め制御の精度に影響し、エレベータモータでは乗り心地に影響を与える。また風力発電機では低速時のコギングトルクによる振動や騒音が環境的観点から地域住民との間で問題となる場合がある。

コギングトルクは無通電時のトルク脈動で、固定子スロットのパーミアンス（磁器抵抗の逆数）と回転子起磁力の空間高調波の相互作用で発生し、1回転当り固定子スロット数と極数の最小公倍数でコギングトルクが発生する。

このコギングトルク低減方法としては、(1)磁石形状により起磁力波形を正弦波に近づける、(2)スキューにより固定子スロット空間高調波を打ち消すことの2通りの方法が有効である。また、コギングトルクは製作過程の微小な誤差による影響も大きいため、製作精度に細心の注意を払う必要がある。

第8図にスキューによるコギングトルクの低減効果を示す。解析では製造工程で許容される最大の製作誤差を考慮した。実機で実測した結果、解析値と同等の効果が得られることを確認した。

3.5 絶縁システム

風力発電機は通常山間部や海岸沿いに設置されるため、通常の発電機で行われるようなメンテナンスが難しいことから、設計寿命は数十年を要求される。そのため、コンバータ電源によるサージ電圧や海岸沿いに設置された場合の塩害などを考慮する必要がある。

今回、PMGの固定子コイルに採用した絶縁システムでは電線にマイカ被覆電線、主絶縁に集成マイカテープを採用し、コイル端部と接続部の水密性を特に強化した。絶縁性能の検証はモデルコイル及び実機で下記試験を実施した。

- (1) 部分放電試験
- (2) 絶縁破壊試験
- (3) 汚損試験
- (4) 耐熱寿命試験
- (5) ヒートサイクル試験
- (6) 浸水試験（実機）

これらの検証試験により、本PMGの絶縁システムは、コロナフリーや耐塩害性能を十分に満足できる結果を得ることができた。

3.6 構造体の変形確認

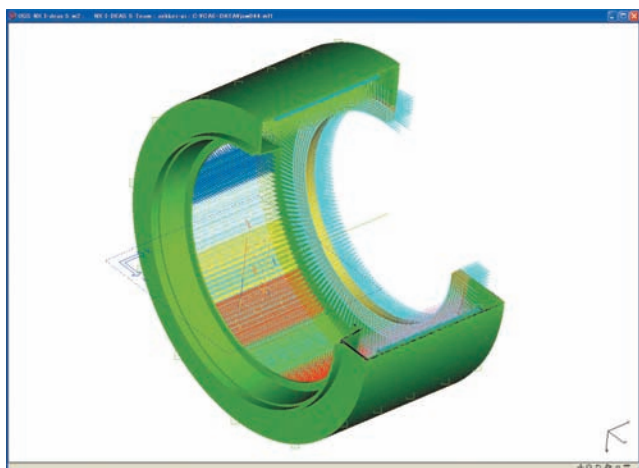
本PMGは固定子がタワー側のみで、回転子は風車側の軸受部のみでそれぞれ支持されている。よって、双方とも片持ち構造の変形し易い構造であり、各構造物の剛性を高くして変形を低減する

ことが必要である。しかしながら、タワー上部に設置されるため軽量化が絶対条件となっている。よって、固定子と回転子の構造体は、風車やPMGの自重及び風車の受ける風荷重による変形を十分考慮した上で軽量化にも配慮した設計が必要であり、FEM解析手法を利用して各構造体の強度及び変形の確認を行った。

第9図に固定子のFEMモデルを示す。固定子はフレーム及び固定子鉄心をモデル化し、固定子巻線を質量としてモデルに付加している。固定子鉄心は電磁鋼板の積層構造であるため、直交異方性材料としてモデルを作成している。固定子鉄心内径には回転子からの磁気吸引力が作用するが、風荷重を受けることによる回転子の偏心などによりエアギャップが不均一になるため、各所で作用する磁気吸引力も変化する。よって、これらを考慮

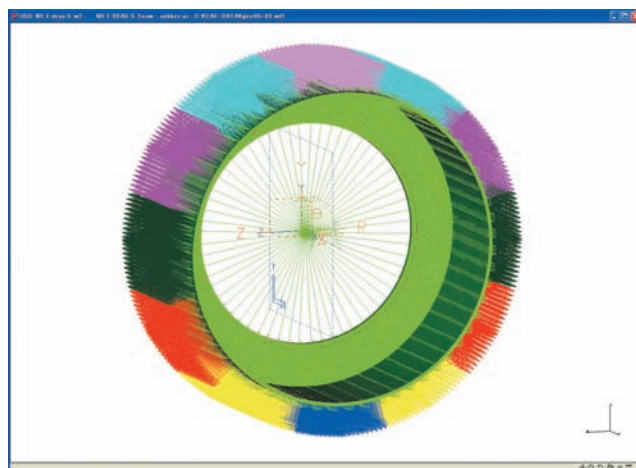
した磁気吸引力をモデルの固定子鉄心内径に付加した。第10図に固定子の解析結果を示す。解析により、固定されたタワー側を支点として風車側へ倒れるように変形し、固定部根元に最大応力が発生することを確認した。

第11図に回転子のFEMモデルを示す。回転子はスパイダをモデル化し、回転子表面に取り付けた永久磁石を質量として付加している。スパイダの軸受取り付け部に軸受剛性と同等のバネ要素を追加し、軸受を模擬している。固定子鉄心内径に回転子側からの磁気吸引力が作用するのと同様に、回転子側もエアギャップ量に応じた磁気吸引力が作用する。そのため、固定子と同様の磁気吸引力をモデルのスパイダ表面に付加している。第12図に回転子の解析結果を示す。解析により、回転子が軸受固定部を支点とし、タワー側が固定子側に



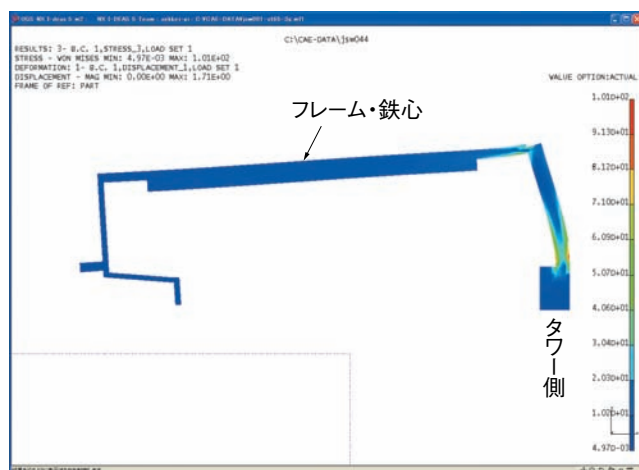
第9図 固定子FEMモデル

フレームと固定子鉄心をモデル化し、コイルなどは質量として付加している。固定子内径に磁気吸引力を作用させている。



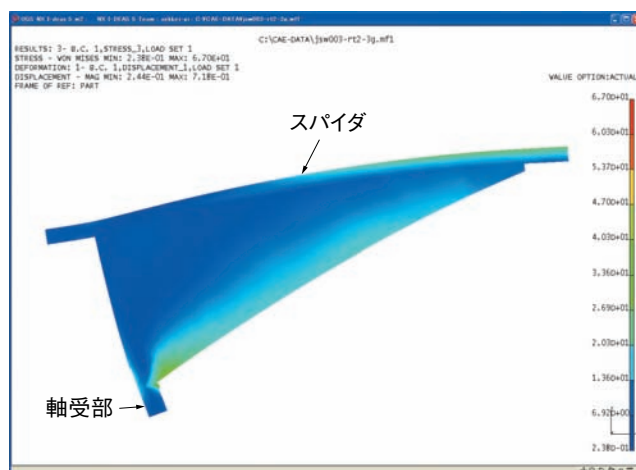
第11図 回転子FEMモデル

スパイダをモデル化し、磁石質量と磁気吸引力を表面に付加している。



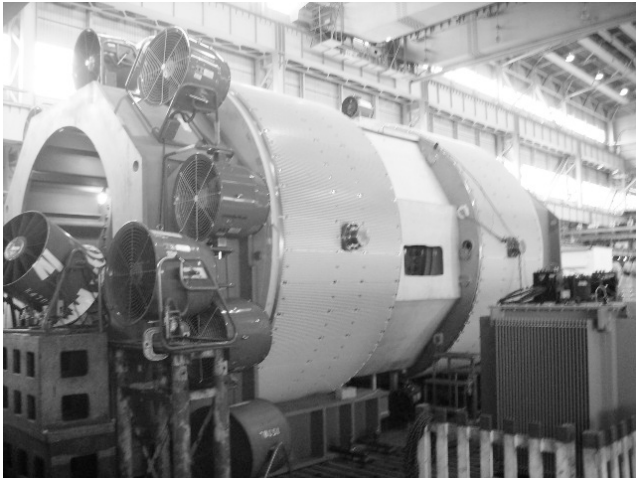
第10図 固定子解析結果

固定点のタワー側を支点にして風車側へ倒れるように変形しているのが確認できる。



第12図 回転子解析結果

固定点の軸受部を支点として固定子側へ引き寄せられるように変形しているのが確認できる。



第13図 実機試験状況

実機を2台直結して片方を駆動機として運転し、実負荷試験を行い現地での運転を模擬した。各種特性や温度などに問題が無いことを確認した。

引き寄せられることを確認した。

回転子の遠心力による変形についても確認を行った。低速回転機のため遠心力による影響は少なく、自重や磁気吸引力による変形と比較してごく小さいことを確認した。

固定子と回転子の各解析結果から、変形量はPMGのエアギャップに対して十分小さく、風力発電機の運転に問題無いことを確認した。

4. 実機による検証試験

今回の開発では実機の実負荷試験を行い、PMGの現地運転を模擬した検証を行った。第13図に実機の試験状況を示す。実機を2台製作して直結し、片方を駆動機、もう片方を発電機として運転して各種特性を確認した。本PMGは外被表面冷却構造のため、冷却用ブロア及び風洞を設置し、PMG表面

付近に仕様通りの風速が確保できるよう考慮した。

このような条件で実負荷試験を行い、電気的特性及び各部温度が開発仕様を満足し、振動・騒音値についても現地での運転に問題の無い値であることを確認した。

5. む す び

以上、当社で開発した風力発電用PMGの特長や検討・検証事項について簡単に紹介した。自然エネルギーの利用は拡大していく傾向にあり、風力発電機も更なる出力アップ及び高効率化が求められている。今後も風力発電用PMGの性能向上のため、新しい技術の蓄積に努めていく所存である。

末尾ながら、本PMGの開発に関してご協力いただいた(株)日本製鋼所の関係各位に、厚く御礼を申し上げます。次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



武井知巳 Tomomi Takei
回転機的设计・開発に従事



太田伸也 Shinya Ota
回転機的设计・開発に従事