

中型風力発電機の本セル開発

渡辺 聡* 権田 友彦** 倉橋 嘉裕*** 前田 誠** 山本 毅****

抄 録

カーボンニュートラル，サーキュラエコノミなど環境負荷軽減に向け，地域でエネルギーを地産地消すること，およびリユース部品を活用し新たな価値を創出することが重要である．その実現方策として，自動車部品を転用し配電網に接続可能な中型風力発電機の構想がある．このたび，環境省の実証事業に参画し，社会課題の解決に貢献するため，国産初となる中型風力発電機の本セル開発に着手した．

1. はじめに

再生可能エネルギーの需要が高まる中，分散型電力普及や過疎地インフラの投資抑制のため，自家消費型電源を想定し，配電網に接続可能な発電出力50kW台の中型風力発電機の構想がある⁽¹⁾．これは，EVと同等の出力であり，そのシステムは増速機と発電機によって構成される．当社も電動PT領域に進出しており，このコア技術を活用し，自動車部品を転用することで，安価で高品質な構成部品を短期間で提供することを狙う．

2. 中型風力発電の本セル開発概要

2.1 開発コンセプト

前述のとおり自家消費型電源を想定し，発電出力は日本国内の低電圧配電網に接続可能とされている50kWとした．サイズは事業所の敷地に適した規模 (Fig. 1) とし，価格も一事業主が経済的に運用可能なレベルに設定した．また，風車が生活圏に設置されることを考慮し，騒音問題とならないように静粛性も確保することとした．さらに，コストと環境負荷低減を両立するため，自動車部品をリユースし，循環型システムを築くことにした．

2.2 中型風力発電機の仕様概要

実施例として，実際に制作した実証機の主要諸元を以下に示す．

1) 風車概要

-定格出力：50kW (目標，主軸定格回転数60rpm)

- 定格風速：11m/s
- カットイン-カットアウト風速：3.0 - 25.0m/s
- タワー高：18.9m
- ロータ直径：18.2m

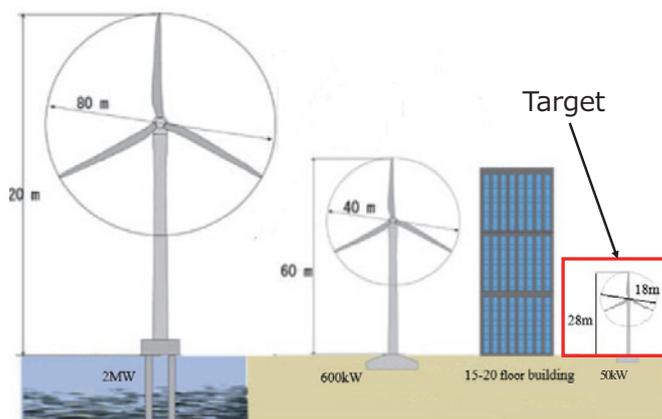


Fig. 1 Power generation and wind turbine size

参考に，風力発電機の性能を理解する上で一般的な出力特性の定義をFig. 2に示す．

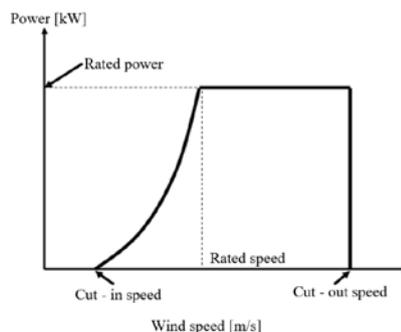


Fig. 2 Power curve of wind turbine

* 部品システム開発部 ** イノベーション技術開発部 *** 制御システム開発部 **** プロジェクト推進部

2)ナセル概要 (Fig. 3)

- 発電機 : 機電別体タイプ (市販車転用)
- 増速機 : 平行5軸式
- 冷却装置 : 水冷制御式(市販車転用)
- 主軸ブレーキ: 無励磁作動 ドラムブレーキ
- ヨー制御装置: 三相駆動モータ式 ブレーキ付
- ナセルサイズ: L 4.4×B 2.2×H 2.4m
(カウル抜 L 3.0×B 1.7×H 1.2)
- ナセル質量 : 5,212kg

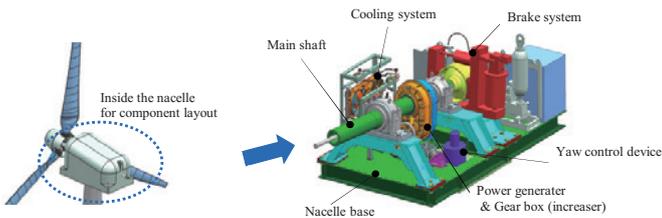


Fig. 3 Inside the nacelle

3. 開発プロセスと主要技術

3.1 開発プロセス

この開発プロセスに当社がこれまでに築き上げたシステムズエンジニアリング (以下SE) を応用することにした。SEを適用することで、当社では未経験である風力発電用ナセルという新しい開発対象においても、サブシステム、ナセル、風車と各システム階層の要求のつながり、機能、構成部品を漏らすことなく設計することが可能となる。また、V字プロセスの評価体系を構築し、各階層において検証企画を立案することで、大型の設備を導入することなく、効率的に実験検証を可能にする。

具体的な実施例と主要技術について次節以降で紹介する。

3.2 ハードシステム設計

上位の風車システムからナセルシステムへの要求をユースケース図により分析した (Fig. 4)。前述の通り、自家消費型電源としての発電出力と、環境負荷低減を実現するため自動車のモータ・インバータのリユース品活用が本開発において重要であることがわかる。

次に、ナセルの機能・構成要素を漏れなく抽出し、各要素の設計上必要な前提条件を決定するため、市販されている小型風力発電機を基に、ナセルシステムが担う主要な5つの機能と、構成要素、周辺要素との物理量のIN-OUTをコンテキスト図にて明確にした (Fig. 5)。

- 【機能1】 発電する → 発電増速機
- 【機能2】 旋回する → 旋回機構
- 【機能3】 主軸を停止する → 主軸ブレーキ機構
- 【機能4】 発電性能を維持する → 冷却機構
- 【機能5】 状態を監視・通信する → 冷却系コントロールユニット

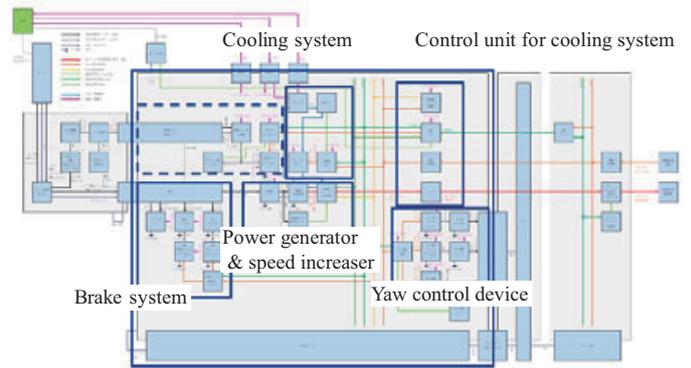


Fig. 5 Context diagram

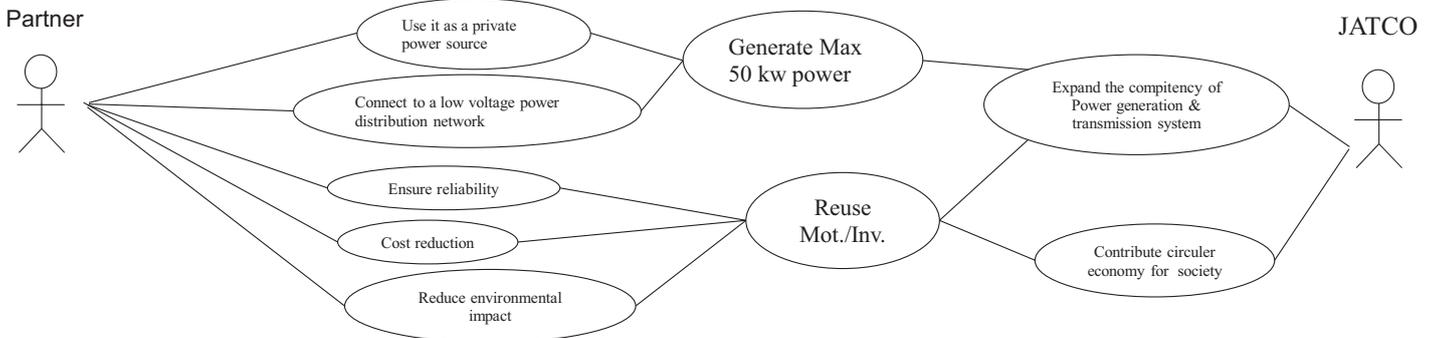


Fig. 4 Use case diagram for wind turbine system

その上で各要素の要求を定義し、目標値を割り付け、詳細な設計を実施した。主要なコンポーネントとして発電機には回生出力が目標値に近い市販車のモータ・インバータを転用した。また、静粛性確保のため主軸回転は60rpmとし、増速機のギヤ比102.8とすることで、モータを最大効率で運転できるように設計した。こうして設計された発電増速機の仕様をTable 1, Fig. 6に示す。

Table 1 Function and specifications for wind power

Request (R)	Function (F)	Specifications (L)
Generate electricity	Generate electricity	Motor regeneration output *Kw Voltage 240~400V
	Transmit power (Determine the motor operating point)	Speed increase ratio 102.8
	Transmit power (Ensure reliability)	Spindle maximum input torque 7,958 Nm
		Spindle maximum speed 70 rpm
Ensure quietness (Main shaft speed 60rpm)	Reduce transmission loss	Transmission efficiency *%
Operate continuously	Control inverter water temperature	Water cooling mechanism (for commercial vehicle use)
	Lubricate gearbox parts	Built-in electric pump

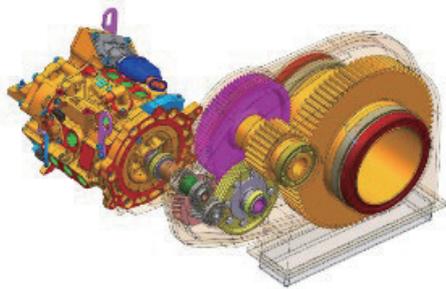


Fig. 6 Exterior of power generator & increaser

こうして設計された本セルシステムは、約130点の部品群で構成され、自動車および産業機器を参照し、本中型風力発電機の本セル開発コンセプトを実現する転用設計を多数施した。実証機における部品転用割合は約3割を占めたが、量産化に向けて、さらに転用率の向上が期待できる (Table 2)。

Table 2 The reuse rate of automotive parts

	Prototype	Mass production	
Nacelle ASSY	29%	Approximately 40%	
Power generator & increaser	38%	Approximately 50%	
		Motor	←
		Inverter	←
		Lubricating oil pump	←
		Sensor	←
		Lubricant fluid	←
Nacelle system	12%	16%	
		O-rings, etc.	←
		Cooling system	←
		Coolant	←
		Sensor	

3.2 制御システム設計

風力発電機全体のシステムのうち、当社は発電機の維持管理のために以下の (1) ~ (4) の制御を担当した。

- (1) 発電機の水冷補機の作動量制御
 - (2) 増速機の潤滑量制御と温度監視
 - (3) 上位指令に基づく補機類の起動/停止制御
 - (4) 異常状態検知時、上位システムへ停止を要求
- 制御開発範囲をFig. 7に示す。

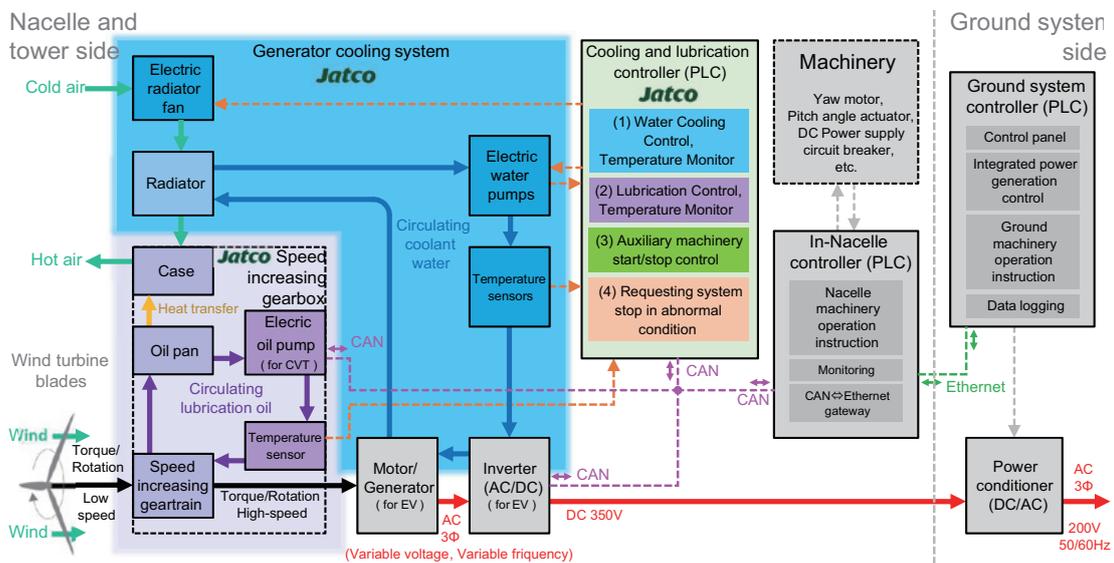


Fig. 7 Concept block diagram

風力発電システムは当社として未知の分野であり、また共同開発先である風力発電機メーカーも自動車とは異なる文化圏であったため、要求仕様の明確化と齟齬のない共有が重要な課題であった。そこでタイムチャート等のSEのツール群を用いることで、社内外での仕様の共有を図ることができた。共同開発先と制御仕様を合意した時のタイミングチャートの一例をFig. 8に示す。

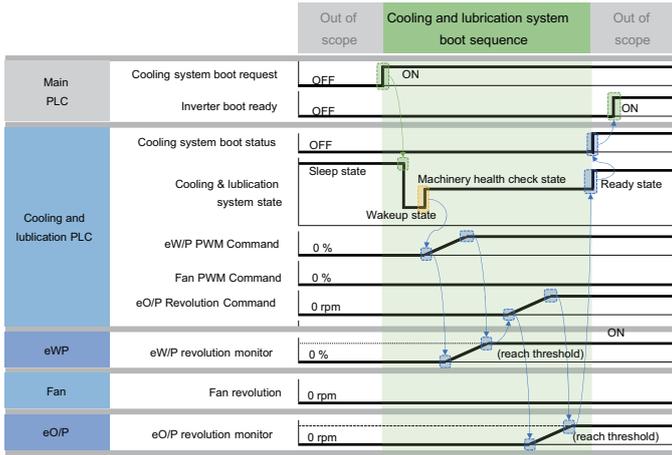


Fig. 8 Timing chart

制御開発プロセスとしては当社で標準的に採用しているModel Based Development (以下MBD) プロセスを採用した。これにより社内の制御モデルライブラリの活用と制御開発担当者の流動的な割り当てが可能となる他、実機ハードウェアが未完成の段階からModel In the Loop Simulation (以下 MILS) や Hardware In the Loop Simulation (以下 HILS) で検証のフロントローディングが可能となるといったメリットがある。

今回は産業向け汎用コントローラであるProgrammable Logic Controller (以下 PLC) を採用したが、PLCには当社標準のC言語ベースでのMBDの開発環境が整備されていなかったため、今回PLC向けMBD環境の構築とPLC実装用のベースソフトウェアの内製開発を行った。PLC向けMBD環境とソフトウェア構造の概要をFig. 9に示す。

また、MBDプロセスにより実際に開発された制御モデルのコア部をFig. 10に示す。本図には入出力などの処理を割愛したコアアプリケーション部のみを示しているが、Fig. 7に準じた機能配置となっていることがわかる。

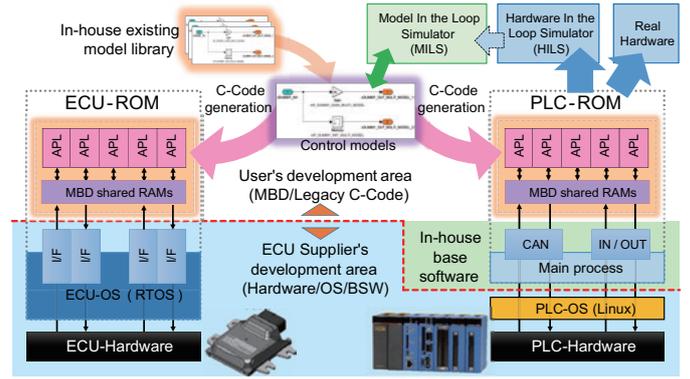


Fig. 9 Overview of MBD development environment and software structure

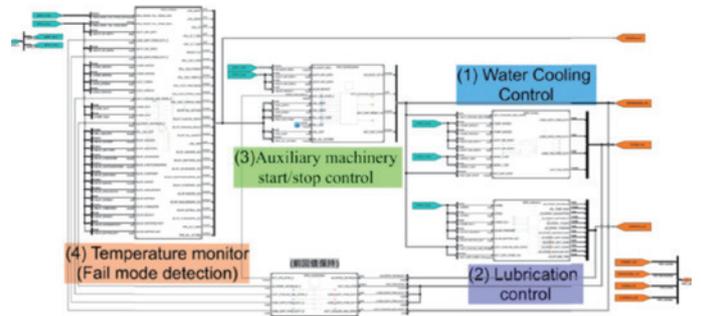


Fig. 10 Control model diagram (core part)

MILS検証においては、このコア部にプラントモデルを接続した形で早期に動作検証を実施し、続くHILS検証では並行開発していたPLCのベースソフトウェア部や通信・入出力モデルと結合して実行形式にまとめ、実機PLCを用いた検証を行った。これにより想定されるセンサ/アクチュエータの挙動範囲において制御が問題なく動作することを実験供試前に確認できた。

これらPLCへのMBD適用とMILS/HILS運用により、既存モデルライブラリの活用、流動的なチーム編成での開発、検証のフロントローディングによる開発期間の圧縮を図ることができた。さらに副次的な効果として、社内の生産設備でのPLC制御開発においても、MBD適用や自動車向け制御モデルライブラリを転用した開発スキームの礎を築くことができたと考えられる。

3.3 実験検証

実験検証も設計と同様に自動車開発プロセスで用いられるV字プロセスを適用した。各工程で課題を検出し、対策した上で次の工程に進む手順を踏むため、後工程で課題が検出されるリスクを抑えることができた。今回、工程をサブシステム、ナセル、風車の3つに区分し、各工程で要求仕様に対する検証を実施した。

各工程と主な検証項目の関係をTable 3に示す。

始めにサブシステムにて検証を行った。サブシステムは、発電機と増速機を組み合わせた状態で、発電容量、冷却水及び油温度など風車の基本的な性能と信頼性検証を行った。

次に、ナセルにて検証を行った。ナセルは、発電機及び増速機と周辺ユニットを組み合わせた状態で複合的に動作させ、相互干渉による影響や起動・停止シーケンスなどの機能検証及び信頼性検証を行った。そして最後に風車の状態で総合的な性能、機能、耐久信頼性の検証を現在も行っている。

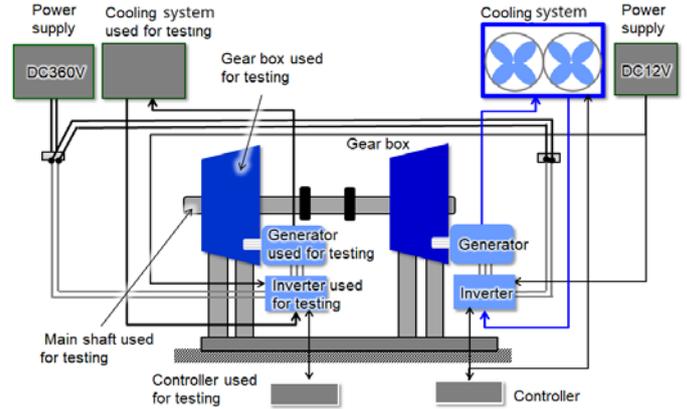


Fig. 11 Test system of sub-system

次にナセルの検証システムをFig. 12に示す。ナセルは、主軸とその周辺ユニット及び、旋回用ユニットなど複数のユニットが組み合わされている。しかし、風車のロータが設置されていないことにより、風などの外力で主軸を回転させ検証を行うことができなかったため、発電機を駆動機として動作させた。その結果、相互干渉による影響及び起動・停止シーケンスなど機能検証などを行うことができた。

Table 3 Relation between each process and testing items

Process	Performance verification	Functional verification	Reliability verification	Durability verification
Sub-system	○		○	
Nacelle		○	○	
Wind turbine	○	○	○	○

ここで、サブシステムの検証システムをFig. 11に示す。サブシステムにて発生する最大トルクは約8,000Nmにも達するため、自動車に搭載されるコンポーネントを検証する既設の設備では対応することができない。しかし、検証するために新規に設備を導入した場合、高額な導入コストが発生するとともに、長納期による開発日程への遅れが懸念される。このため、本検証において2つの試作機を連結し、1つを駆動用として使用し、他方を発電用として使用する検証システムを製作した。この結果、検証システムの導入コストを大幅に低減することが可能となり、更に開発日程に影響を及ぼすことなく、検証を行うことができた。

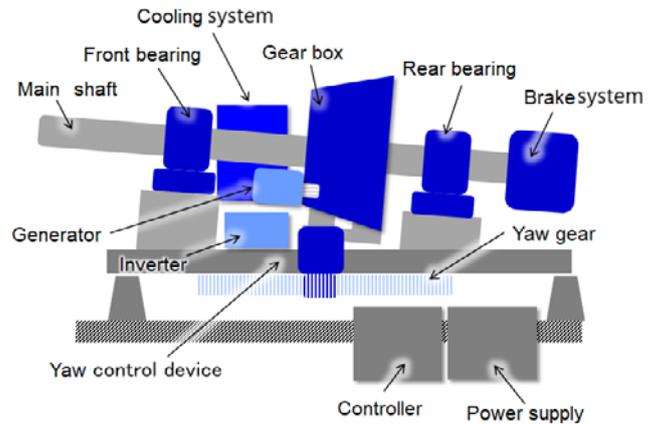


Fig. 12 Test system of nacelle

4. 検証結果

サブシステム、ナセルの検証結果の一部をTable 4に示す。Table 4より、各検証で要求仕様を満足した。

Table 4 Testing results

Process	Items	Verification results
Sub-system	Rated power	○
	Rated speed	○
	Rated torque	○
	Efficiency	○
	Maximum coolant temperature in generator	○
	Maximum oil temperature in gear box	○
Nacelle	Sequence operation of start-stop	○
	Rotating operation of main shaft	○
	Operation of brake mounted on main shaft	○
	Yaw turning operation of nacelle	○

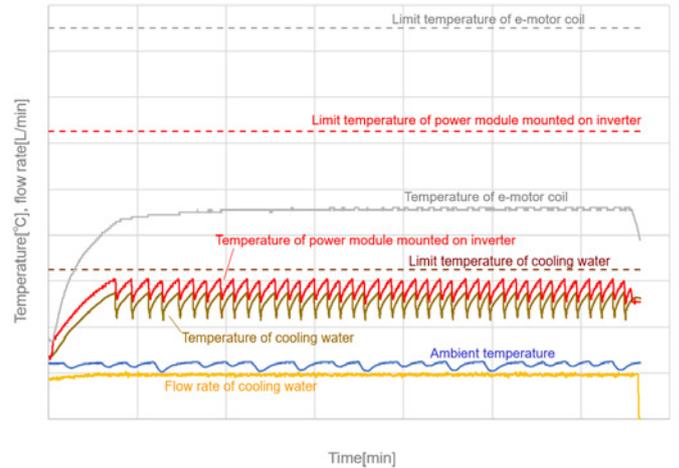


Fig. 14 Temperature testing result

こうして実機試験用に製作されたナセルを実証実験用の風力発電タワーに組み込んだ。ナセルをFig. 15に、風力発電機をFig. 16に示す。

ここで、風車性能の主な指標となる発電機と増速機の効率検証結果をFig. 13に示す。増速機に適切なギヤ比を設定することで、自動車用モータの効率の良い領域を使用することが可能となり、良好な発電効率を実現できていることがわかる。

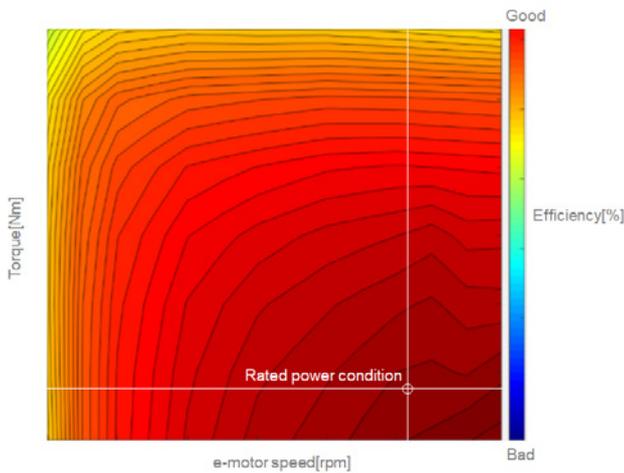


Fig. 13 Efficiency testing result

次に、連続運転時の温度評価結果をFig. 14に示す。今回、ラジエータなど自動車用冷却装置を風車に適用するため、新たな制御ロジックを織り込んだPLCをナセルに搭載しているが、モータ温度、インバータ温度共に許容範囲を下回り、風車として要求される長時間の連続運転においても問題ないことが検証できた。

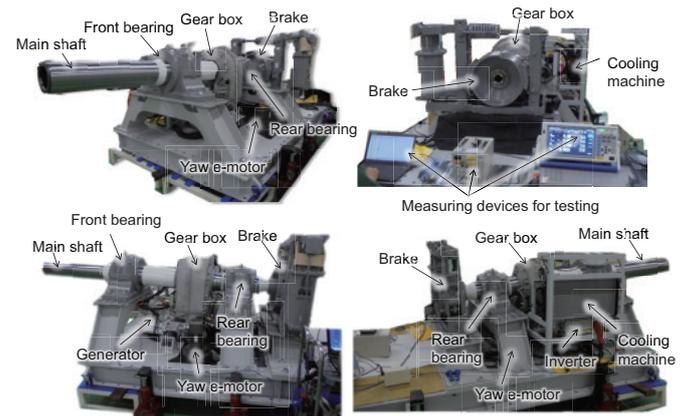


Fig. 15 Nacelle used for testing



Fig. 16 Wind turbine generator

5. まとめ

環境省受託の国産初50kW風力発電用ナセル開発に挑戦し、実証機の試作を完了させた。自動車部品を多数転用することで、開発期間の短縮、コスト低減の見込みが立った。特に、発電機に市販車のモータ、インバータを使用し発電性能および信頼性を実機検証できた。これにより、自動車部品の転用可能性を確認できた。AT、CVTの開発を通して当社が築いてきたSEは本開発にも有効である。

6. あとがき

今後、ナセルシステムにバッテリーを接続し、発電から充電、そして給電の電力を制御する技術(電力マネージメント)に挑戦していく予定である。この技術を習得すること、つまりモータ、インバータ、減速機とバッテリーを繋ぎ意のままに動かす(EVを動かす)ことにより、システムサプライヤ(Tier 0.5)としての展望が開けることになる。

7. 参考文献

- (1)ゼファー株式会社：地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業(低圧風力発電機に関する技術開発・実証)委託業務報告書(2024年発行予定)

■ 著者 ■



渡辺 聡



権田 友彦



倉橋 嘉裕



前田 誠



山本 毅