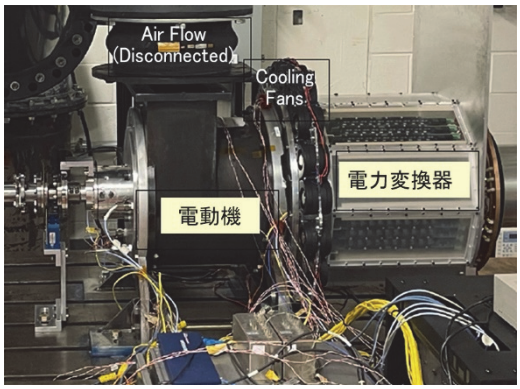
メガワット級超軽量空冷モータ・インバータシステムの実証研究

Demonstration Project of a Megawatt-Class Ultra-Lightweight Air-Cooled Motor and Inverter System



飯田 耕一郎[*1] Koichiro Iida
佐々木 幹人[*2] Mikito Sasaki
中神 孝志[*3] Takashi Nakagami
三舩 智也[*4] Tomoya Mifune

モビリティ等の電化ニーズにおいては，出力の増大と軽量化の両立が求められており，本報では，マサチューセッツ工科大学と共同研究中の，メガワット級モータ・インバータシステムの技術実証機について紹介する。先鋭的なコンセプトを適用した技術実証機の設計・試作・実験による検証を通じて，電磁気，パワーエレクトロニクス，機械システム，熱マネジメント，製造技術にわたる，複数の要素技術の進展と，これらの統合設計技術を確立し，技術基盤の強化と領域拡大を図っている。

1. はじめに

脱炭素化や周辺技術の進展に合わせ，電化における電力ニーズは増大傾向にある。一方，出力の増大に伴い，発熱や絶縁等への対策の必要性から，電動機（モータ・発電機）や電力変換器（インバータ等）の出力密度（単位重量あたりの出力）は低下する傾向がある（図 1）。NASA の将来目標として，電動機に対して 13kW/kg，電力変換器に対してもおよそ同等レベルの出力密度が設定されているが，1 メガワット級でこれを超えることは容易ではない。このため，今後の電化モビリティ等の大型化に向け，出力の増大と軽量化の両立には，新たな技術チャレンジが求められる。

三菱重工業株式会社（以下，当社）とマサチューセッツ工科大学（以下，MIT）は，ガスタービンや先進的エネルギー変換技術において長年にわたる研究パートナーシップを築いてきた。これを基盤とし，原動機分野の電化トレンドに対応するため，1 メガワット級の電動機・電力変換器統合システムの技術実証プログラムに共同で取り組んでいる。MIT による電磁気，パワーエレクトロニクス，機械システム，熱マネジメント，製造技術にわたる，学際的で理論に基づいた研究アプローチと，当社の幅広い技術対応力との連携により，システムレベルで高度に統合した，先進的な電動機アーキテクチャ，及び，分散型パワーエレクトロニクスの設計，試作，及び，実験による検証を進めている。

*1 総合研究所 エナジー研究推進部 主席研究員 技術士（機械部門）
*2 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主席チーム統括
*3 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主席研究員
*4 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部

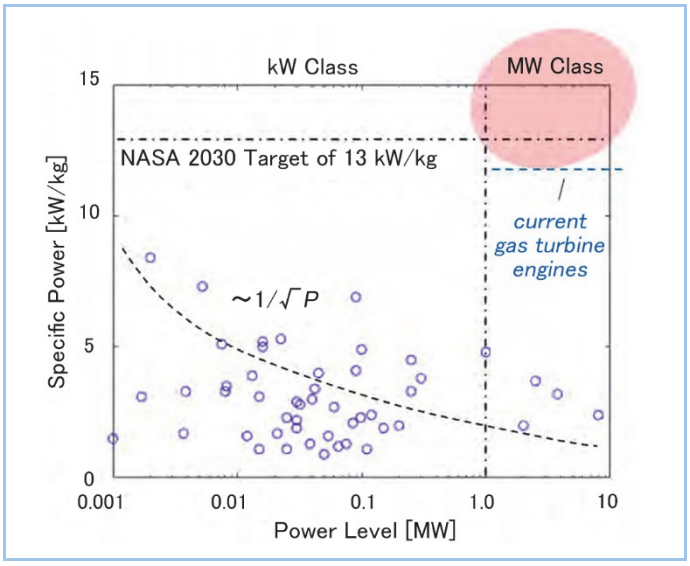


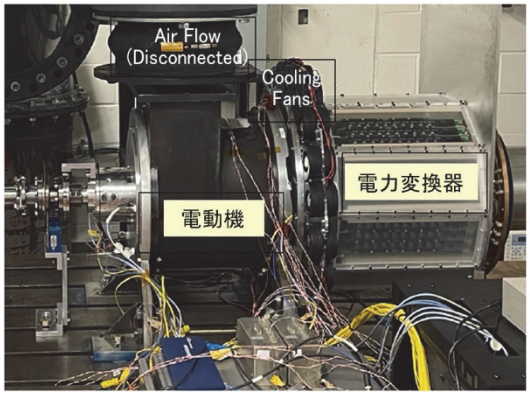
図1　電動機の出力と出力密度の関係

2. 設計コンセプト

1MW 技術検証機の概要，電動機と電力変換器の高度な一体設計，並びに，電力変換器の分散・並列化の設計コンセプトについて紹介する。

(1) 主な仕様

図 2 に 1MW 技術検証機と主要仕様を示す。写真左側が電動機（モータ・発電機）であり，この右側に隣接するように電力変換器（インバータ・コンバータ）が配置・一体化されている。外殻・保持構造部の重量を含まない，電磁気・電気回路・ロータ外筒・伝熱（冷却）要素部品で算出した出力密度はそれぞれ，電動機 17kW/kg（推定），電力変換器 38kW/kg を達成している。ロータ回転軸は図 2 左側に延びており，回転速度は 12500rpm となる。電動機・電力変換器ともに，外気吸込みによる強制空冷方式を採用し，電動機は上部が別空気源に接続し空気を吸引し，電力変換器は筐体周囲に配置されたマルチファンのみで空冷している。軸受はグリス潤滑のため，冷却用途も含めオイル系統は用いておらず，完全空冷で冷却用外部熱交換器を必要としないコンセプトとした。



技術検証機主要仕様	
出力	1MW
回転数	12500rpm
電圧	720Vdc
極数	20極（10極対）
冷却方式	強制空冷
潤滑	グリス潤滑

図2　1MW 技術検証機（電動機・電力変換器）の外観と仕様

(2) 電動機における機械・電磁気の一体設計

電動機においては機械・電磁気の一体設計を図っており，その構造を図 3 に示す。一般的な電動機は，回転するロータの外周側にステータが配置されるが，本設計ではステータの外周側にロータを配置したアウターロータ構造を採用した。磁石の外周側はチタン合金製リムで保持し，強度的に許容する限りロータを高速で回転させる。一方，磁石内周側には保持構造物を

挟まず，磁石と内周側ステータとの間隙を最小限に維持することで，高い磁束密度を達成している。これにより，高速と高トルクを両立し，出力を最大化している。また，ロータ磁石は多極（10極対）かつハルバッハ磁石配列を採用し，バックヨークを用いず磁力を高め，軽量化を図るとともに，磁気装荷を上げることで出力密度を上げる工夫をしている。

アウターロータ構造としたことで，ロータとステータはそれぞれ反対側から片持ち支持構造とした。ステータ鉄心の内周側はステータ及びステータとロータ間のエアギャップの冷却空気経路となり，金属積層造形で製作したステータ鉄心保持構造がステータの空冷フィンを兼ねる構造とした。

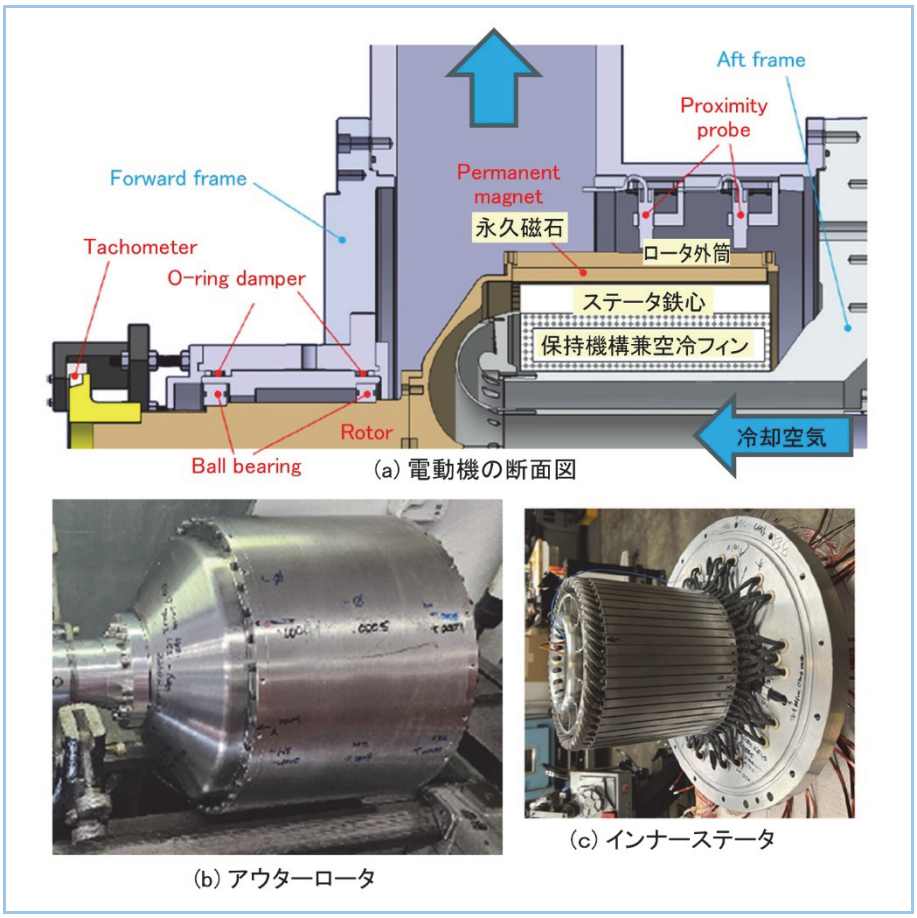


図3　電動機の構造（ロータ・ステータ）

(3)　電動機と電力変換器の一体設計

図 4 に本電力変換器の回路方式を示す。本技術検証機における，電動機と電力変換器の最大の特徴として，電動機側の各相を両端子出し巻線（オープン巻線）とし，電動機の各極 1 相ごとに単相 H ブリッジを接続する方式を採用している。高回転数で多極であるため電動機の定格周波数が高く，これに伴い，高いスイッチング周波数が必要となり，解析を用いた比較により，パワー素子面積当たりの電力変換器損失に優れる本方式を採用している。加えて，H ブリッジの入力側（図 4 のS_{a1}&$\bar{S}_{a1}$に該当）と出力側（図 4 のS_{a2}&$\bar{S}_{a2}$に該当）のスイッチングを半周期ずらすことで実効的なスイッチング周波数を 2 倍とできるほか，直流電圧を正側，負側それぞれ利用できることから，1MW の出力を 720Vdc と低い電圧に抑制しながら，1 ケーブル当たりの電流，及び，発熱・損失を抑制している。

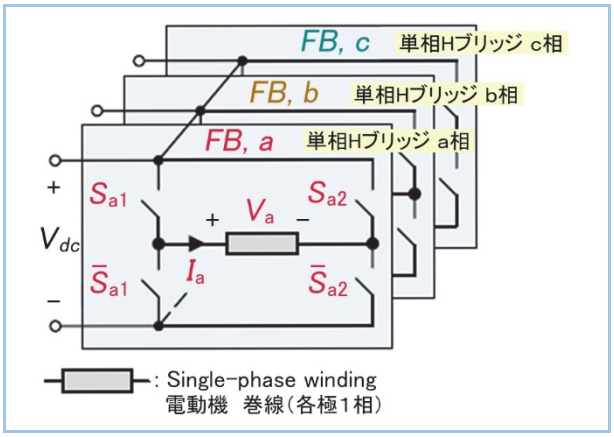
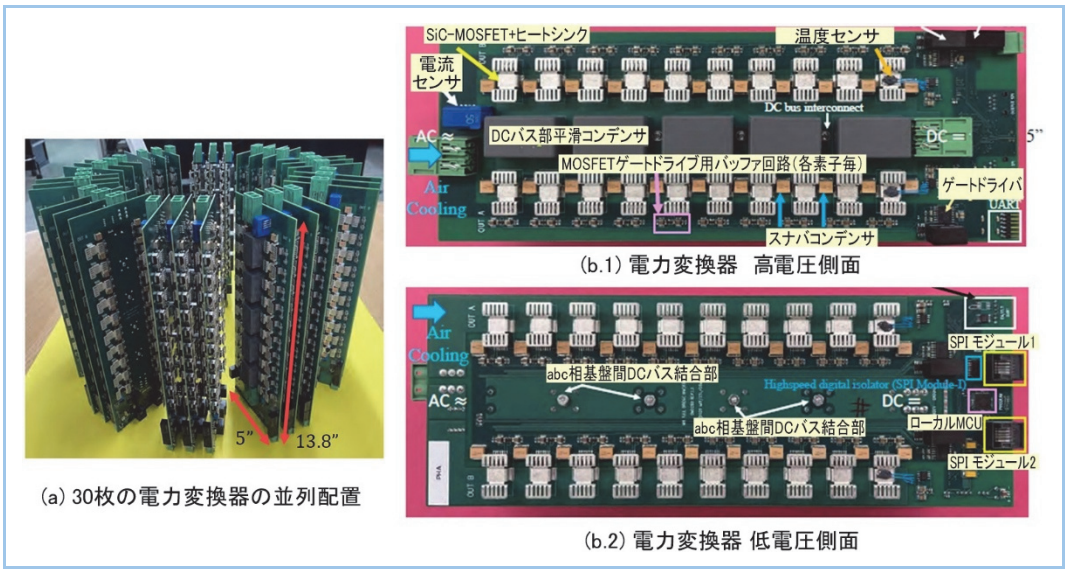


図4 電力変換器の回路方式

(4) 電力変換器の分散・並列化

電力変換器においては，高周波数化に対応するため，パワー素子を多並列化している。図5に電力変換器の配置と構造を示す。各極各相の H ブリッジ回路を 1 枚の電力変換器基板(33kW 相当)で構成し，10 極対分，合計 30 枚の電力変換器を，電動機のステータにあわせて円周状に分散配置している。1 枚の基板の表と裏をそれぞれ，高電圧側(図 4 のS_{a1}&S_{a2}に該当)，低電圧側(図 4 の$\bar{S}_{a1}$&$\bar{S}_{a2}$に該当)に割り当て，H ブリッジ回路の 4 つのスイッチを，各々 10 個の並列配置した SiC-MOSFET で構成している。スイッチング周波数は 160kHz(80kHz×2)と，電動機定格周波数 2kHz に対して十分高く設定し，正弦波に近い電流制御を実現している。また，ケーブル長を短くし，スイッチング周波数を高くとることで，DC 側のインダクタや平滑コンデンサ容量を最小限に抑制し，かつ，多並列化により 1 素子あたりの電流を減らすことで，冷却部品は空冷のためのフィンのみとし，高い出力密度を達成している。



(a) 30枚の電力変換器の並列配置

(b.1) 電力変換器 高電圧側面

(b.2) 電力変換器 低電圧側面

図5 電力変換器の配置と構造

3. 技術検証機の試作・検証

技術検証機の試作過程においては，損失や振動の低減，強度や放熱性の確保，等の点で各要素や個別部品単位での試作・検証と対策を重ねながら，段階的に進めた。

図 6 に，MIT に据え付けられた 2 台の技術検証機を示す。2 台を軸で接続し，1 台はモータ，もう 1 台は発電機として，電力を回生させることで，試験に必要な電力を抑制し，各種検証を進めている。

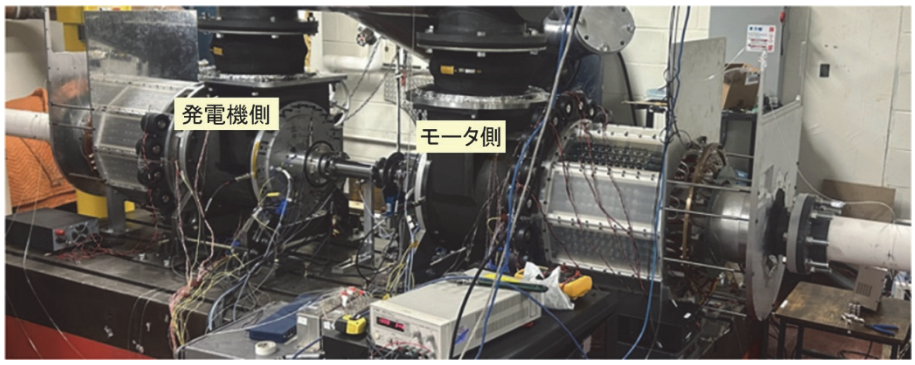


図6 モータ・発電機として直結した技術検証機と回生運転試験

4. まとめ

高度な一体設計コンセプトを特徴とする，MIT との共同研究による 1 メガワット級電動機・電力変換器の実証研究について紹介した。本研究成果は，今後の電化トレンドにおける出力増大ニーズに対する一つの解決策になると考えている。また，電動機や電力変換器を特定製品に適用する際は，出力密度のみならず，回転数，トルク，系統電圧，使用環境及び冷却補機条件などの要求仕様への適合も必要であり，重工技報においても電動機に関わる様々な取組みが過去に紹介されている。このため，本報の技術検証機にとどまらず，オープンイノベーションによる先鋭的な挑戦を通じ，技術基盤強化と領域拡大を図り，今後の多様なニーズへの対応により，さらなるイノベーションの加速を目指していく。

謝辞

本報作成にあたり，図表の利用を許可頂いた，MIT ガスタービン研究所所長 Spakovszky 教授，並びに，本研究遂行に携わられている MIT 関係者に厚く御礼申し上げます。

参考文献

(1) Spakovszky, Z. S., et al., Technology Demonstration of a Megawatt-Class Integrated Motor Drive for Aircraft Propulsion, AIAA Paper 2023-4157
(2) Spakovszky, Z. S., et al., Performance Assessment of a 1 MW Air-Cooled Electrical Machine Demonstrator for Turbo-Electric Propulsion, AIAA Paper 2026-4543