

eVTOL 用発電機の循環電流損低減と冷却性能向上

Circulating Current Loss Reduction and Cooling Performance Enhancement for Generators in eVTOL Aircraft

石井 佑 汰¹

Yuuta ISHII

篠 寄 省 吾¹

Shogo SHINOZAKI

中 富 翼¹

Tsubasa NAKATOMI

神 山 博 夢¹

Hiromu KAMIYAMA

要 旨

ABSTRACT

電動垂直離着陸機用ガスタービンハイブリッド発電システムへの搭載を目指し、高い出力密度の発電機を開発した。本研究は、発電機に要求される出力、重量、回生効率を達成することを目的としている。課題としては、周波数に依存して増大する循環電流損により巻線が過熱することが挙げられ、過熱を抑制するために損失の低減と冷却能力の向上が求められる。これに対し、電磁界解析に基づく損失予測と、実機を用いた循環電流損の評価手法によって、循環電流損の発生原理を検証し、巻線の転位による損失低減効果を明らかにした。さらに、ハウジングに積層造形技術を適用して冷却性能を向上した。本研究のステータ及び冷却構造を適用した発電機を製作して性能試験をおこない、設計目標値の出力密度を達成した。

A generator with high power density was developed with the goal of installation in a gas turbine hybrid power generation system for electric vertical take-off and landing aircraft. The goal of this study was to achieve the output power, weight, and regeneration efficiency demanded of this generator. One challenge is overheating of the windings due to circulating current loss, which increases with the frequency, so reduction of loss and enhancement of cooling capacity are needed to mitigate overheating. To address this, loss prediction based on electromagnetic field analysis and a technique for evaluating circulating current loss using an actual device were used to verify the principle of circulating current loss, and the loss reduction effect of winding transposition was clarified. In addition, cooling performance was enhanced by applying additive manufacturing technology to the housing. A generator with the stator and cooling structure from this study was produced, performance tests were conducted, and the design target power density value was achieved.

1. ま え が き

近年、都市化の進展や人口集積の進行により、交通渋滞の深刻化や環境負荷の増大が都市部における課題となっている。これらの課題に対する解決方法のひとつとして、都市航空モビリティが提案されており、電動垂直離着陸機 (electric Vertical Take-off and Landing aircraft: eVTOL) に関する技術の研究開発が活発化している⁽¹⁾。

eVTOL は垂直離着陸能力によって滑走路を必要とせず、都市空間において運用ができるため、都市内や都市近郊を中心とした航空移動への活用が想定されている⁽²⁾。また、推進システムの電動化は、プロペラ推進用モータの数を自由に設定できるなど設計自由度を高め、1基のモータ

タが故障しても他のモータで補うことで冗長性を確保できる。さらに、電動化による低騒音や環境負荷低減といった eVTOL の利点を活かすための研究開発が進められている⁽²⁾⁻⁽³⁾。しかし、バッテリーのみで駆動する eVTOL は機体の総重量と推進力の関係からバッテリー容量が制限され、航続距離が限定される⁽³⁾。このようなフル電動 eVTOL に対し、Honda では北米のような長距離の都市間移動を視野に入れた航続距離の実現を目指し、より短時間で移動する喜びを提供するため、ハイブリッド eVTOL の開発に注力している。Honda は自社で保有する航空エンジン開発技術と、国際自動車連盟が管轄するフォーミュラ・ワン世界選手権で培った電動技術を組み合わせることで、航空エンジンとバッテリーを併用するハイブリッドパワー

¹ 統合研究センター

E-mail: yuuta_ishii@jp.honda

ユニットを開発している⁽⁴⁾。

Fig. 1に開発中のeVTOL用ガスタービンハイブリッド発電システムのアーキテクチャを示す⁽⁴⁾。本システムは、ガスタービンによって発電機を回転させることで発生する電力とバッテリー電力を飛行状態に応じて使い分ける構成である。パワーユニットには、負荷が高い垂直離着陸モードにおいて高出力が要求される。一方、長距離飛行を実現するためには機体の軽量化が不可欠であり、パワーユニットにおいても高効率かつ軽量であることが重要な要件である。そこで、本システムの主要構成要素である発電機は、小型軽量で高出力、すなわち高い出力密度が求められる。

Fig. 2に自社で調査したeVTOL搭載用の発電機に要求される出力密度領域と、四輪車用モータの出力密度領域を示す。eVTOL搭載用の発電機は四輪車用モータに対して、数倍の出力密度となることを示している。

本研究ではFig. 2に示したように他社と比較して高出力、高出力密度を目標とし、試験において目標値の達成を確認した。本稿では、試験結果と得られた知見を報告する。

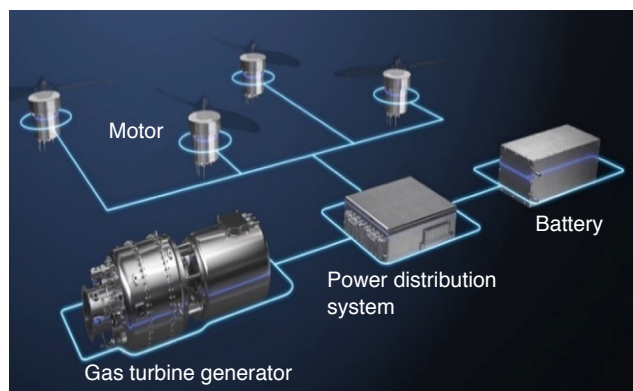


Fig. 1 Architecture of Honda's gas turbine hybrid system

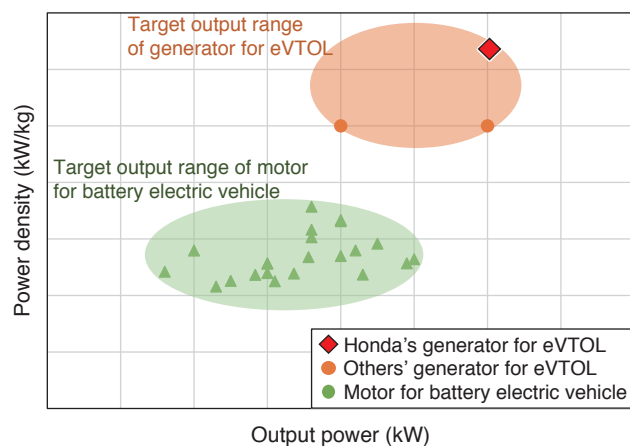


Fig. 2 Relationship between output power and power density

Table 1 Generator specifications

Motor type	SPMSM
Rotational speed	> 50,000 rpm
Output power	Order of several hundred kilowatts

2. 発電機の仕様

Fig. 3に発電機の外観形状、Fig. 4に構成図を示す。発電機は大きく分けてステータとロータ、冷却用のハウジングで構成される。ステータはハウジングに締結され、外部からの軸入力によってロータが回転することで、ロータ磁石による誘起電圧が発生し、電流が流れることで出力電力に変換する役割がある。また、ハウジングには冷媒用の流路が設けられ、ステータで発生した熱を放熱する役割がある。

Table 1に本研究の発電機の基本仕様を示す。定格回転数は50,000 rpm以上、定格出力は数百kW級を想定している。本研究では、高速回転の遠心力に対応するために、ロータ表面に接着した永久磁石を保護スリーブで補強した表面磁石同期モータ (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor: SPMSM) を採用する。

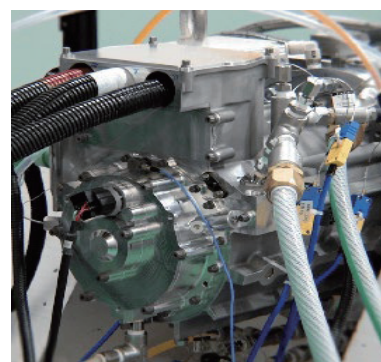


Fig. 3 Appearance of generator

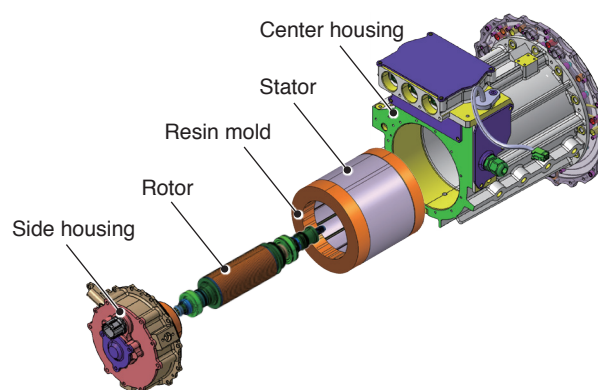


Fig. 4 Generator structure

3. 研究の目的

Fig. 5 に本発電機に要求される項目に対して、課題と対処方法を示した検証フローを示す。eVTOL 用パワーユニットは、小型で軽量かつ高出力を達成するために、量産されている四輪車モータと比較して、数倍の回転数となる高速回転域における連続出力運転を目指している。

高速回転域を定格とする発電機は、通電時に交流銅損の発生が想定される。交流銅損は、Pulse Width Modulation (PWM) コンバータによるキャリア周波数に起因した表皮効果や近接効果による損失と永久磁石の鎖交磁束によって発生する渦電流損、そして巻線配置に起因する循環電流損の三つに大別される。このうち、前者二つについては素線の細線化によって損失の低減が見込める⁽⁵⁾。一方で、多数の素線を並列化した場合、素線間の誘起電圧差により循環電流損が発生し、損失の増加が報告されている⁽⁶⁾。

本研究の高速回転発電機は、高周波起因の交流銅損低減のために素線を多数並列化しており、循環電流損の影響が顕著になる。このため、その損失が増大することで巻線の過大な発熱が想定される。したがって、高速回転発電機の高出力化には、高周波数帯における循環電流損の把握が重要である。

しかしながら、量産モータの回転数域では、循環電流損は顕著に表れず、主要検討項目とはならなかった。また、循環電流損は実機完成後に相電流などの外部計測量から直接評価することが容易ではなく、通電試験で計測される総損失の一部として間接的に把握されるにとどまっていた。このような背景から、高速回転発電機を開発するにあたり、循環電流損を設計段階で定量的に予測し、試験により評価する手法は未発達な状況であった。

そこで本研究では、実機の素線を忠実に再現した電磁界解析により循環電流損の予測を検証するとともに、発電機完成前にステータ単体で循環電流損を評価可能な試験手法を検討した。

巻線発熱の冷却と小型化の両立を図る場合、効率一定のもと発電機の体積を縮小すると放熱面積が制限されるた

め、冷却性能の向上が重要となる。冷却方式は、巻線を直接冷却する油冷方式と、ハウジング内の水路を介して冷却する水冷方式に大別される⁽⁷⁾。油冷方式は回転による油攪拌で高い冷却性能を得られるが、高速回転時には流体摩擦損の増加が想定され、高速回転発電機への適用は容易ではない。一方、水冷方式はステータコアを介してスロット内巻線を冷却できるが、コアを介さないコイルエンド部では冷却効果が低下する⁽⁷⁾。そこで、コイルエンド部に高耐熱樹脂モールドを充填する構造を採用することで水冷方式の適用性を高めた。本研究では、熱伝達率の向上を目指し、モールドの適用と水冷経路を検討したハウジング構造において、熱解析と実機試験により冷却性能を検証した。

以上より、本稿では以下の項目を実施した。

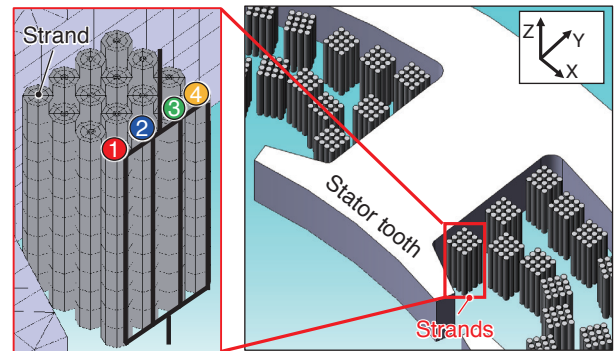
- (1) 循環電流損の評価手法の確立と低減
- (2) 水冷用ハウジング構造の検証

これらの検証を踏まえ、循環電流損を低減したステータと、新型冷却構造を適用した発電機を製作し、性能試験による設計目標値の出力密度の達成を本研究の目的とした。

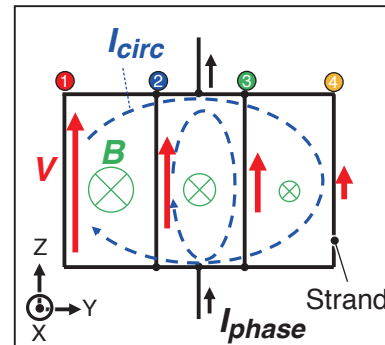
4. 循環電流損の評価と低減

4.1. 循環電流損

Fig. 6(a) にステータのスロット断面と巻線束配置を示し、巻線の中から選出した4本の素線を番号付けして示す。Fig. 6(b) に選出した素線における循環電流発生モード



(a) Strand bundle in the stator slot



(b) Schematic of circulating current generation

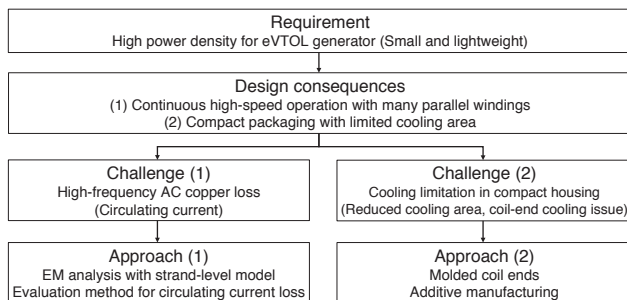


Fig. 5 Overview of challenges and technical approaches

Fig. 6 Strand bundle and circulating current model

図を示す。巻線に流す相電流を I_{phase} とし、通電によって発生する循環電流を I_{circ} 、誘起電圧を V 、磁束密度を B とする。素線束に相電流を流すと理想的には各素線に均一な電流が流れる。しかし、実際は各素線に流れる電流によって生じる自己磁界と隣接素線との相互作用により、磁束は透磁率の高い鉄心側に集中する傾向がある。その結果、スロット内の磁束密度分布は均一にならず、スロット内における素線配置の違いにより、各素線の鎖交磁束量に差が生じる。この鎖交磁束差に起因して素線間の誘起電圧が不均一となり、巻線束内に循環電流が発生する。循環電流損は周波数に伴って増大し、巻線が発熱するため、量産四輪車用モータの回転数域では課題になり得ず、本研究のように高速回転の連続運転を目指す場合に顕著となる。

電磁界解析により循環電流の発生原理を検証する。解析モデルのステータスロット断面を Fig. 7 に示す。本モデルは要求回転数とコンバータの制限電圧で決定したターン数を 7 とし、損失の低減を見込んで並列数を 45 として個別にモデル化した。解析は 2 次元有限要素法で実施し、定格回転数相当の周波数条件で正弦波電流を流した際に、各素線に流れる電流波形を算出した。

Fig. 8 に Fig. 7 の解析モデルを電磁界解析して算出した素線電流波形を示す。任意の解析波形を破線で示し、理想的な波形を赤線で示す。ここで、循環電流が発生しない場合の理想的な素線電流は、全素線において振幅及び位相が同一である。一方、解析で算出された素線電流波形は電流振幅および位相に差異が生じる結果となった。これは、素線間の誘起電圧に差が生じたことで、各素線に異なる電流である循環電流が発生したことを示している。

以上から、電磁界解析によって循環電流が再現することを確認した。

4.2. 転位の損失低減効果

本節では、ステータ巻線仕様が循環電流損へ与える効果

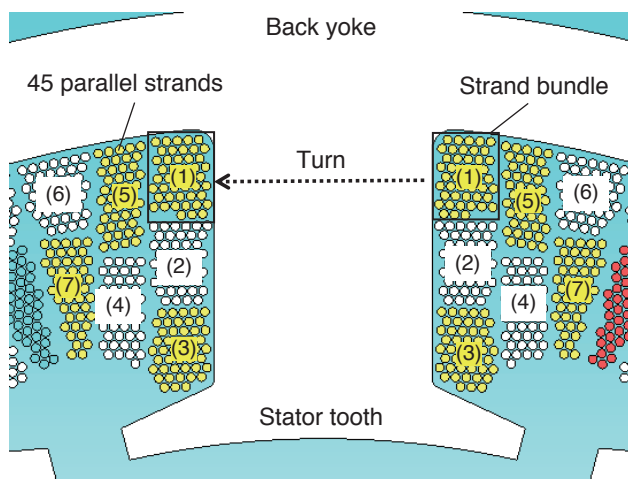


Fig. 7 Cross section of stator

を確認する。循環電流損を低減する手法の一つとして、巻き工程においてコイルエンド部におけるターンの切り替え時に巻線束をひねる、転位がある⁽⁸⁾。

転位の効果を評価するため、転位を施さない条件および 180 度転位を施す条件のそれぞれにおいて、電磁界解析により循環電流損を算出する。本解析モデルの代表素線 1 本を赤丸で示し、転位位置と素線番号付けした解析モデルを Fig. 9 に示す。Fig. 9(a) は転位を施さない場合の素線配置であり、同一スロット内の巻線束が図示した番号付けと同様の配置とした。Fig. 9(b) は転位を施した場合の素線配置

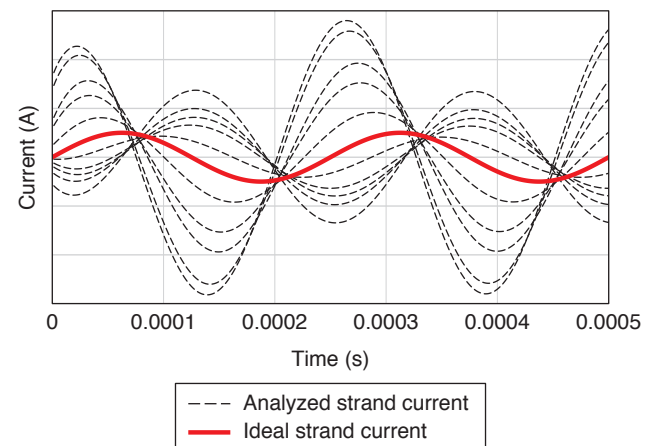


Fig. 8 Calculated strand current waveforms

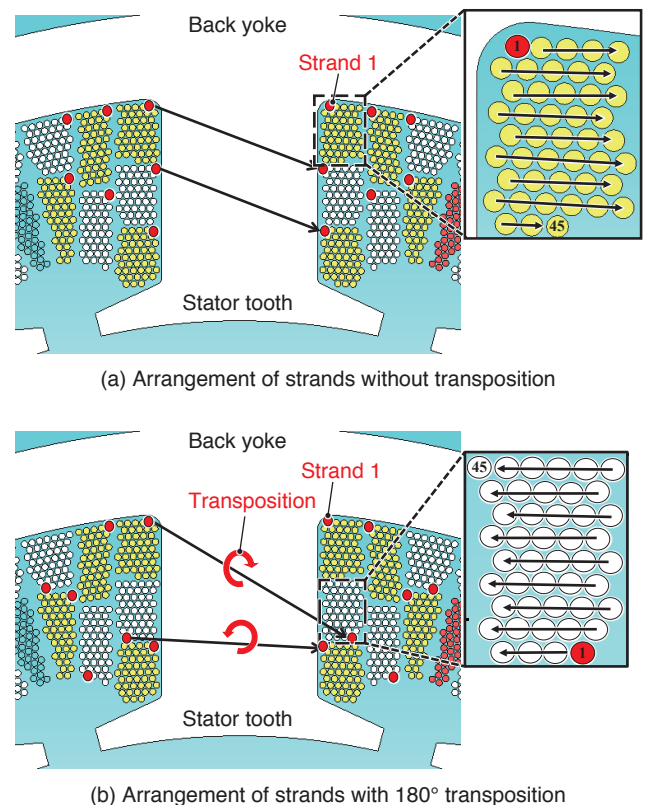


Fig. 9 Analysis models

であり、コイルエンドで180度ひねることにより、同一スロット内で180度入れ替わるように巻線束を配置した。このように、隣り合う束線において素線配置を逆転させることで、巻線束間の誘起電圧差を打ち消すことができ、循環電流損の低減効果が見込める。

Fig. 10にFig. 9の各モデルに対して、定格回転数相当の周波数条件で正弦波電流を通電した際の循環電流損の解析結果を示す。180度転位を適用することで、循環電流損が77%低減できることを確認した。したがって、転位は循環電流損の低減に有効な手段といえる。

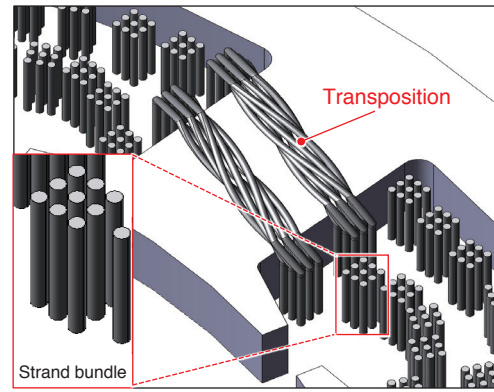
4.3. 転位位置の検討

巻線転位において、コイルエンド位置に限定せず、スロット軸方向に対して180度転位を施す方法を提案する。本研究では、この手法をスロット内転位と呼称する。Fig. 11に各転位手法の3Dモデル図を示す。Fig. 11(a)には従来の転位を示し、Fig. 11(b)にはスロット内転位を示す。理解を容易にするため、巻線束あたりの素線数を9として、2ターン分転位した巻線状態を仮定して示す。スロット内転位は、スロット内部で巻線束をひねるため、スロット開口部とスロット奥側で素線配置を逆転させて配置することで、素線位置を制御することができる。この構成により、各素線が整列した配置となり、巻線束間の誘起電圧差を打ち消すことによる循環電流損の低減効果が見込める。

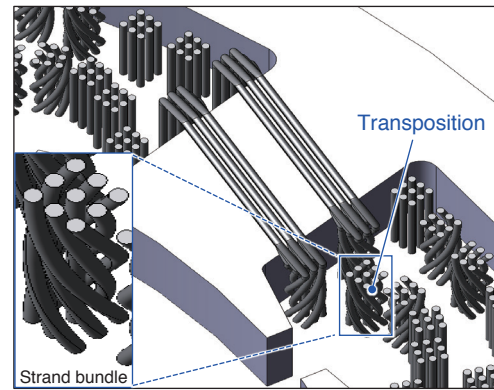
4.4. 試験手法

循環電流損を評価するため、ステータ単体に通電することでステータ損失を実測し、損失分離によって循環電流損を含む交流銅損を評価する手法を提案する。

循環電流損を評価するための試験構成をFig. 12、試験環境をFig. 13に示す。本来、同期発電機をPWMコンバータで通電する際、回転機の回転信号をフィードバックして同期する三相交流電流を指令する。しかしながら、本手法はステータ単体で検証するため、ロータによる回転パルス



(a) Coil-end transposition



(b) Transposition within slot

Fig. 11 Stator transposition structures

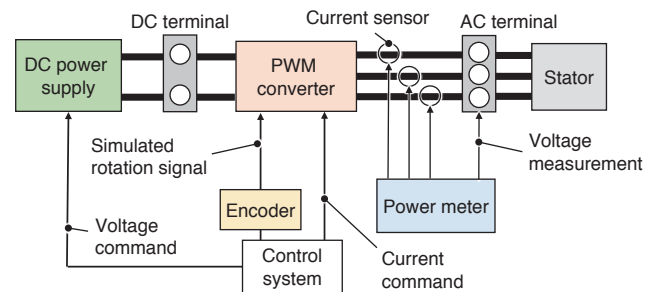


Fig. 12 Test configuration for stator loss evaluation

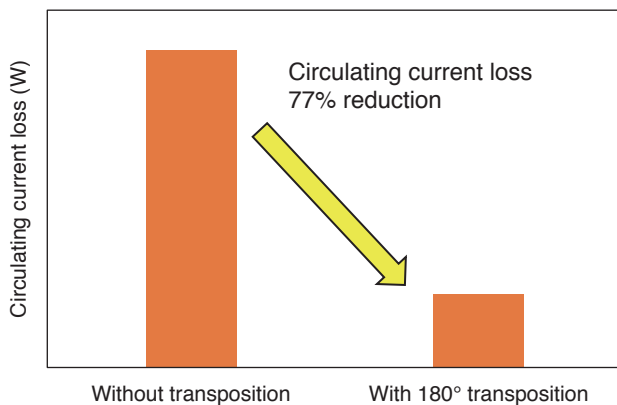


Fig. 10 Reduction of circulating current loss by 180° transposition

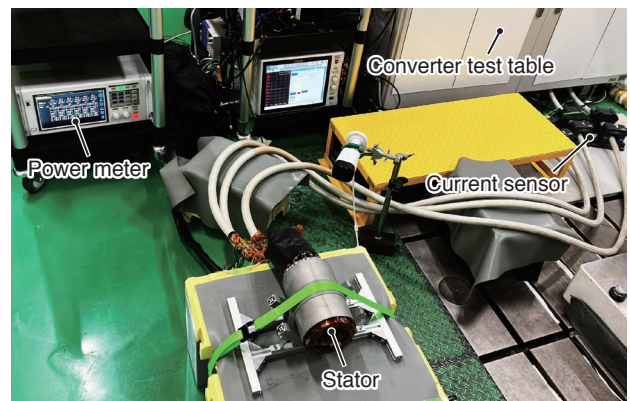


Fig. 13 Test equipment for stator loss evaluation

信号が得られない。そこで、ロータの回転を模擬するため、エンコーダで疑似回転パルス信号を生成することで、三相交流電流を制御でき、実際の発電機の通電状態を模擬できる。このとき、ステータに供給される電力は、ロータが組み込まれていないため機械出力とならない代わりに、ステータの発熱として消費される。つまり、ステータ損失は電力計で測定した三相有効電力の積算値として出力されるため、数値化して評価できる。本来は連続定格出力を模擬する場合、巻線温度を飽和させる必要があるが、本手法においては、ステータ巻線の過熱防止のため、短時間の通電によって損失傾向を確認することを目的とする。

ここで、ステータ損失の内訳は、直流銅損、循環電流損を含む交流銅損、ステータコアの鉄損に分類される。直流銅損 W_{dc} は実測の巻線温度で補正した相抵抗を R 、定格の相電流実効値を I_{phase} としたとき、式 (1) で表される。

$$W_{dc} = 3RI_{phase}^2 \quad (1)$$

ステータコアの鉄損 W_i は、電磁界解析によって算出した。各要素のヒステリシス損失を $Wh_i(B)$ 、各要素でのジュール損失 $We_i(B)$ 、各要素での磁束密度を B 、定格回転数相当の周波数を f としたとき式 (2) で表される。

$$W_i = \sum_i^n (Wh_i(B, f) + We_i(B, f)) \quad (2)$$

ここで、実験結果より得られたステータ損失を W_{loss} としたとき、循環電流損を含む交流銅損 W_{ac} は式 (3) で表される。

$$W_{ac} = W_{loss} - W_{dc} - W_i \quad (3)$$

従来の転位を施したステータ A とスロット内転位を施したステータ B の実機を製作し、通電試験によって各ステータの損失を評価する。Fig. 14 に各ステータにおいて、定格回転数相当の周波数条件で正弦波電流を通電した際に実測された循環電流損を含む交流銅損 W_{ac} を示す。ステータ B はステータ A に対して 61% の損失低減効果が確認さ

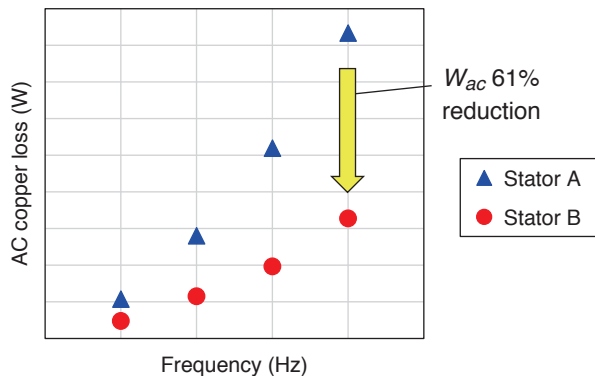
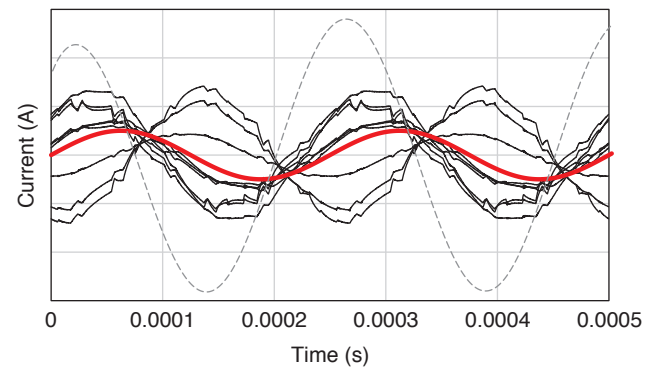


Fig. 14 AC copper loss evaluation results including circulating current loss

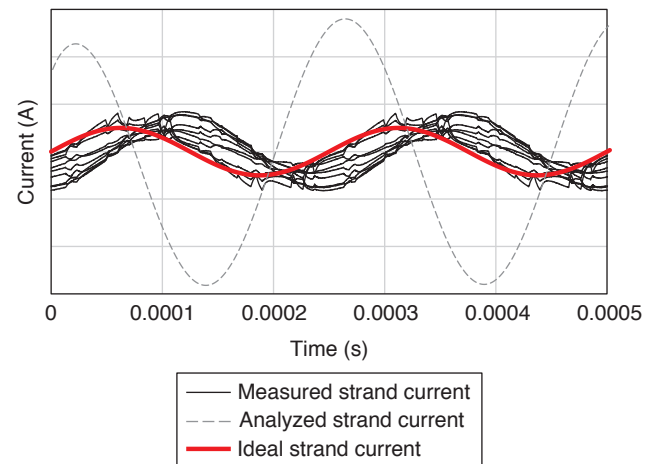
れた。この結果を踏まえ、両ステータの素線束のうち巻線温度が高い巻線束を選定し、その束から任意に選定した素線について電流を計測した。各素線電流の振幅および位相を確認して循環電流を評価した。

Fig. 15 に定格回転数相当の周波数条件において正弦波電流を通電したときの任意の素線の電流波形を示す。黒線が測定電流で、赤線が理想的な電流波形、破線が Fig. 8 で示した転位なし条件における解析結果の電流波形である。

Fig. 15(a) に示すステータ A の素線電流は、転位なし条件に対して、電流振幅を低減できる。しかし、理想波形に対しては各素線において振幅および位相がそれぞれ異なり、循環電流の発生が確認された。一方、Fig. 15(b) に示すステータ B は、振幅および位相の変化がステータ A より小さく、循環電流の低減が実証された。以上より、ステータ B では素線の相対配置が Fig. 9(b) で示した理想的な素線配置に近づいており、循環電流損低減に有効な手段としてスロット内転位の効果が実証された。本仕様では、スロット内転位を適用したステータ B を採用する。



(a) Stator A strand current



(b) Stator B strand current

Fig. 15 Measured strand current waveforms

5. 冷却性能評価

5.1. 冷却性能の成立性検証

Fig. 16 に高耐熱モールド樹脂を適用した解析モデルを示す。コイルエンドに熱伝導率の高いモールド樹脂を充填することで、巻線とハウジング間に伝熱経路を形成できる。一般にモータにおけるハウジング内の冷却水路構造の中でも、らせん構造は熱伝達係数の増加、表面積の拡大、巻線温度の低さなど、優れた放熱性能を発揮する⁽⁹⁾。本研究では、らせん構造を採用し、冷媒として Long Life Coolant (LLC) を供給する構成を検討した。本構造について熱解析をおこない、必要な放熱量を確認する。本解析では、コイルエンド部に定格出力運転時の発熱量を与え、モールド材料の熱伝導率は 3.4 W/mK とした。冷媒は LLC を想定し、供給温度を 40°C 、流量を 10 L/min に設定した。このとき、冷媒が水路を通過して得られる温度差から放熱量を算出して評価した。

解析の結果、らせん構造に対して 2 割以上向上させる必要があることを確認した。本冷却構造において、高い出力密度を達成するためには、ハウジングの流路構造の検討による冷却能力向上が不可欠である。

5.2. 冷却構造の検証

Fig. 17(a) に鋳造で製作したらせん水冷構造を示し、Fig. 17(b) にハウジングに積層造形 (Additive Manufacturing: AM) 技術を用いて製作した軸方向水冷構造の解析モデルを示す。以下、本構造を AM 水冷構造と呼称する。AM 技術を適用することで、多数の小径水路を形成でき、緻密な流路構造を実現して熱伝達率の向上を狙っている。これらの解析モデルに対して熱解析をおこない、各構造の放熱量を比較する。本解析では、ステータを模擬したダミー発熱体を用いたモデルを対象とした。冷媒は LLC を想定して供給温度を 40°C 、流量を 10 L/min に設定した。Fig. 17 の各モデルは、比較のために同等の体積とした。まずは Fig. 17(a) モデルに想定される発熱量を与える解析をおこない、発熱体の温度を取得し、Fig. 17(b) モデルの発熱体に適用することで同等の温度条件における放熱量を解析し、冷媒温度差に基づく放熱量を算出する。

解析の結果、らせん構造に対して、AM 水冷構造の放熱量は 1.3 倍となることを確認した。しかし、本解析は放熱

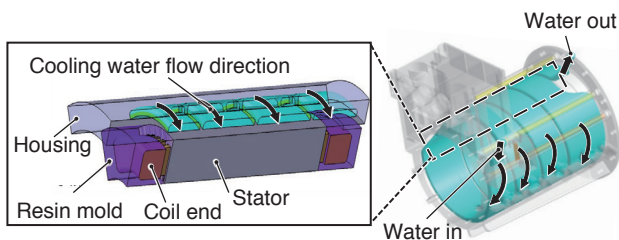


Fig. 16 Cooling structure model for thermal analysis

向上効果の確認を目的としており、試験結果を使用した解析結果の検証はおこなっていない。そのため、4.4. 節で採用したステータ B を AM 水冷構造のハウジングに締結し、モールド樹脂を充填したサブコンポーネントを製作して、ステータに通電する実機試験をおこなう。この試験結果より、通電によって上昇する巻線温度が設定した上限温度以下となることを確認する。

試験は 4.4. 節のステータ通電手法を適用する。回転数は定格回転数に相当する疑似回転信号を入力した状態で巻線に連続通電をおこなった。このとき、巻線温度が時間的に変化せず、飽和状態に至るまで通電を継続した。冷媒は LLC を供給し、温度を 40°C 、流量を 10 L/min に設定した。

Fig. 18 に試験より得られた相電流と巻線最大温度の関係を示す。また、同図には設計目標値の出力となる定格相

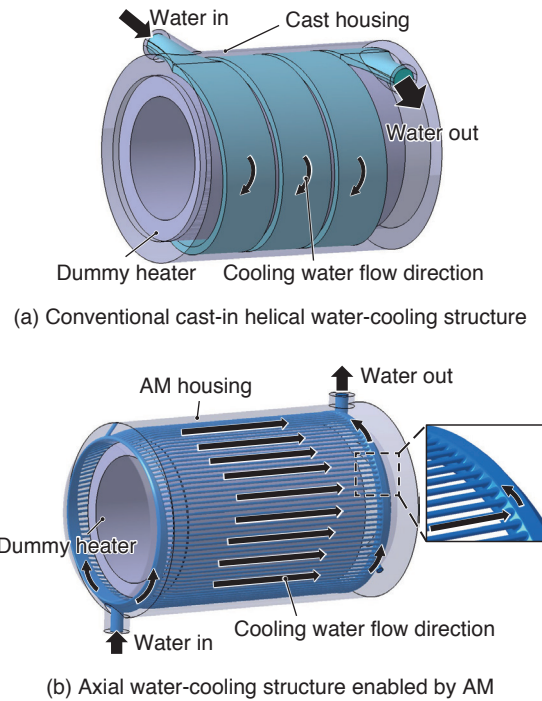


Fig. 17 Water-cooling housing structure

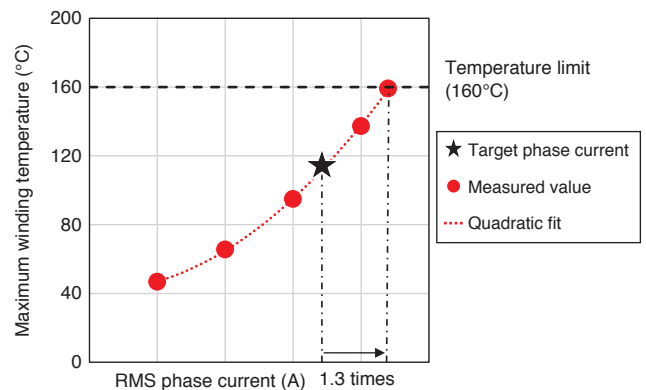


Fig. 18 Relationship between maximum winding temperature and phase current in AM structure

電流値をプロットする。その結果、定格相電流値に対して、1.3 倍の相電流を通電できることを確認した。したがって、巻線の上限温度に対して十分に低い飽和温度となるため、目標出力が達成される。以上から、AM 構造を本仕様として採用する。

6. 出力性能評価

6.1. 試験概要

スロット内転位を施したステータ B にモールド樹脂を充填し、AM 水冷構造を適用した発電機を製作した。本仕様において性能試験をおこない、出力特性と冷却性能特性を確認した。

Fig. 19 に性能試験の構成を示す。ダイナモの回転数を増速させてガスタービン同等の回転数とした負荷を発電機に接続し、コンバータ制御によって回生運転が可能な試験構成とした。ダイナモの回転数を制御して発電機を所望の回転数で運転した状態で、発電機の巻線温度が時間的に変化せず、飽和状態に至るまで通電を継続した。冷媒は前章の解析と同じ条件とした。

6.2. 試験結果

Fig. 20 に本発電機の回生出力と巻線最大温度の関係を

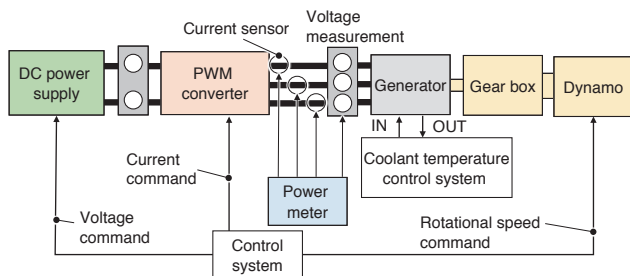


Fig. 19 Configuration of generator performance test setup

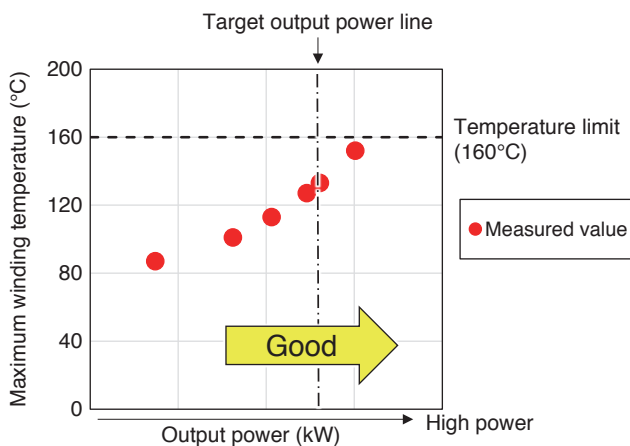


Fig. 20 Relationship between maximum winding temperature and output power in generator assembly

示す。同図には定格出力ラインを示しており、本発電機は設定した上限温度以下で、定格出力を超える動作点まで 10 分以上の連続通電できることを確認した。

Fig. 21 に試験結果より得られたトルクと回転数に対する効率マップを示す。同図には、回生運転領域において、実測した回生出力をプロットした。本発電機は、定格出力で動作する高トルクと高回転域において 95% 以上の発電効率にて 10 分以上の連続運転ができることを確認した。

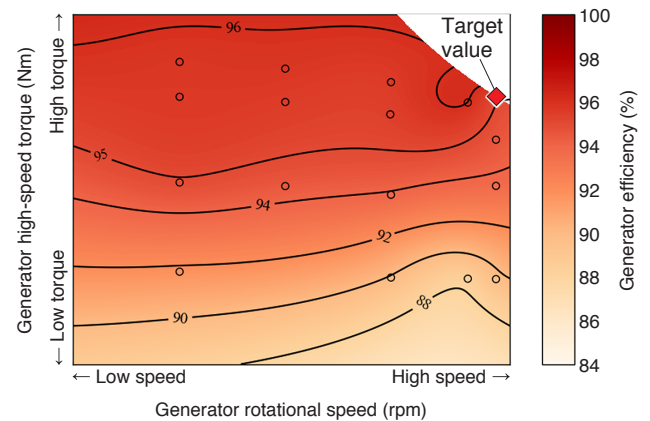


Fig. 21 Generator efficiency map as function of torque and rotational speed

7. まとめ

eVTOL 用ガスタービンハイブリッドシステムの主要構成要素である発電機において、スロット内転位を適用して循環電流損を低減したステータと、ハウジングに AM 技術を適用して冷却性能の向上を図ったハウジング構造を開発した。これらの技術を適用して発電機を製作し、設計目標値の出力密度を達成した。また、実証試験から以下の知見を得た。

- (1) 素線配置による循環電流発生原理を電磁界解析によって検証し、巻線を転位することで循環電流損の低減効果を確認した。さらに、循環電流損を含む交流銅損の実測結果から、ステータの転位仕様における循環電流損の比較をおこなった。その結果より、損失低減効果の大きいステータ仕様を選定した。
- (2) 熱解析の検証によって、AM 技術の適用による緻密な冷却水路の構築と高耐熱モールド樹脂を適用した AM 水冷構造は、鋳造で製作したラセン水冷構造に対して抜熱量が 1.3 倍となることを示した。さらに、ステータ損失評価手法を応用することで、ハウジングの抜熱量を評価した。AM 水冷構造を適用した発電機を製作し、冷却性能及び定格出力を実証した。

今後の展開として、フライトを模擬した環境条件で運用するために、更なる出力密度の向上を目指す。

参考文献

- (1) Ugwueze, O., Statheros, T., Bromfield, M. A., Horri, N.: Trends in eVTOL Aircraft Development: The Concepts, Enablers and Challenges, AIAA SciTech Forum, AIAA 2023-2096, (2023), doi: 10.2514/6.2023-2096
- (2) Thomas, G. L., Malone, B. P.: Power System Redundancy Design Trends for All-Electric eVTOL Quadrotors, AIAA SciTech Forum, AIAA 2023-1209, (2023), doi: 10.2514/6.2023-1209
- (3) Zong, J., Zhu, B., Hou, Z., Yang, X., Zhai, J.: Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems, Aerospace, Vol. 8, p. 256, (2021), doi: 10.3390/aerospace8090256
- (4) 本田技研工業株式会社: https://global.honda/en/tech/eVTOL_gas_turbine_hybrid_system/, (参照 2026/01/07)
- (5) 鈴木樹, 楡井雅巳, 堀内学, 佐藤光秀, 卜穎剛, 水野勉: 超高速回転における交流損失を低減する埋込巻線形同期モータ, 日本 AEM 学会誌, Vol. 28, No. 2, p. 122-127, (2020), doi: 10.14243/jsaem.28.122
- (6) 山崎克巳, 于海洋, 大口英樹, 首藤雅夫: 永久磁石同期機における電機子巻線循環電流を考慮した損失解析, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 138, No. 6, p. 553-560, (2018), doi: 10.1541/ieejias.138.553
- (7) 杉本慎治, 郡大祐: 水冷・油冷を併用したモータの冷却効果および損失評価の検討, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 138, No. 5, p. 378-383, (2018), doi: 10.1541/ieejias.138.378
- (8) 河野匠, 朝間淳一, 志田博, 長谷部敬之: 多本線持ち整列分布巻工法を用いたモータの循環電流損の評価, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, Y-83, (2022)
- (9) Wang, Q., Wu, Y., Niu, S., Zhao, X.: Advances in Thermal Management Technologies of Electrical Machines, Energies, Vol. 15, Issue 9, Article 3249, (2022), doi: 10.3390/en15093249

■ 著 者 ■



石井 佑汰



中 富 翼



篠 寄 省 吾



神山 博 夢