

集中巻モータの非対称ロータ構造による出力密度向上

高橋朋平*
Tomohira Takahashi
北尾純士†
Junji Kitao
深山義浩†
Yoshihiro Miyama

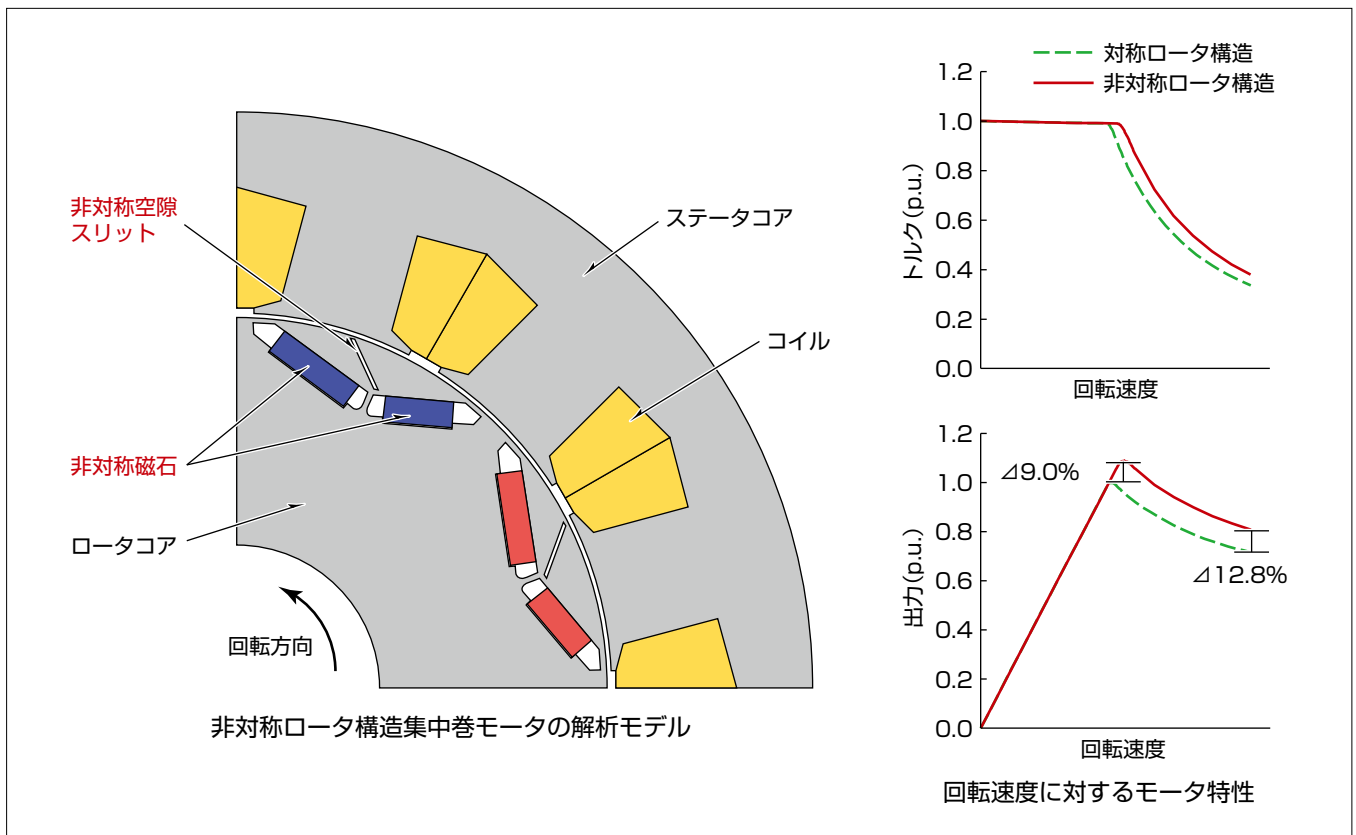
Power Density Improvement of Concentrated Winding Motor Using Asymmetric Rotor Structure

要旨

モータは、産業機器、自動車、鉄道、家電等の様々なアプリケーションに適用されている。また、どのアプリケーションでも、モータに要求する出力密度(体格に対する出力の大きさ)は年々増加傾向にある。しかしながら、そのようなアプリケーションの中でも、両回転方向に同等のモータ出力密度を要求するアプリケーションがある一方で、一回転方向にだけ高いモータ出力密度が要求されるアプリケーションもある。

今回、後者のアプリケーションの要求に対応するため、

一回転方向の出力密度向上に特化した非対称ロータ構造のモータを開発した。独自の非対称空隙スリットを設けることによって、特定の回転方向で、対称ロータ構造に比べて高いトルクを発生させる磁気回路を実現した。さらに、油-水熱交換器を備えた油を用いた高効率な冷却構造によって、磁気特性が高いものの高温での使用ができなかった磁石の使用を可能にした。結果として、世界最高クラスのモータ出力密度23kW/Lを達成した。



非対称ロータ構造

様々なアプリケーションに適用されるモータの中には、一回転方向だけの特性が求められるモータが存在する。三菱電機は特定の回転方向で出力性能を特化させた非対称ロータ構造のモータを開発した。この構造はロータコアの中に非対称空隙スリットを設けることで、対称ロータ構造に比べて高いトルクを発生させる磁気回路を構築し、世界最高クラスのモータ出力密度を実現した。

1. ま え が き

モータは、産業機器、自動車、鉄道、家電等の様々なアプリケーションに適用されている。どのアプリケーションでも、アプリケーション自体を小型化・軽量化するため、モータに要求する出力密度(体格に対する出力の大きさ)は年々増加傾向にある。しかしながら、そのようなアプリケーションの中でも、両回転方向に同等のモータ出力密度を要求するアプリケーションと、一回転方向にだけ高いモータ出力密度が要求されるアプリケーションがある。

本稿では、後者のアプリケーションの要求に対応可能である、一回転方向にだけ高いモータ出力密度を実現する非対称ロータ構造の検討内容について述べる。初めに、出力密度を向上させるために重要な、モータのトルクと誘起電圧について述べる。次に、従来の集中巻構造を持つ埋込磁石同期モータ(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM)について、分布巻構造のモータと比較しながら、巻線構造の違いによるトルクの特徴について述べる。最後に、トルクの特徴から考案した集中巻構造を持つIPMSM向け非対称ロータ構造と、その出力密度特性について述べる。

2. 出力密度とトルク・誘起電圧の関係

モータの出力は、モータのトルクと回転速度を用いて次式で表される。

$$P = T \cdot 2\pi \cdot N / 60 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P : 出力(単位: W)

T : トルク(単位: Nm)

N : 回転速度(単位: r/min)

出力はトルクに比例するため、出力向上のためにはトルクの増加が効果的であることが分かる。IPMSMが発揮可能なトルクは“マグネットトルク”と“リラクタンストルク”の2種に大別できる。マグネットトルクはロータ内に埋め込まれた磁石とステータが吸引・反発することによって発生するトルクであり、その大きさは磁石から発生する磁束に比例する。一方、リラクタンストルクは、ロータ内にある磁気的な突極とステータが吸引することで発生するトルクであり、ロータ形状に強く依存する。

このように、マグネットトルクはロータ内磁石から発生する磁束に比例するため、その磁石磁束を増やすことで総合トルクの向上が可能である。しかし、モータの“誘起電圧”も磁石磁束に影響される点に留意しなければならない。

通常、モータに接続されるインバータなどの駆動装置は、パワーモジュール等に素子耐圧が設定されているため、

モータ設計側では、最高回転速度運転時の誘起電圧が素子耐圧を超過しないように制約を設ける場合が多い。

モータの最高誘起電圧は、磁石磁束と最高回転速度から次式で表される。

$$V_{\max} = \Phi \cdot 2\pi \cdot N_{\max} / 60 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V_{\max} : 最高誘起電圧(単位: V)

Φ : 磁石磁束(単位: Wb)

N_{\max} : 最高回転速度(単位: r/min)

このとき、最高誘起電圧は磁石磁束に比例する。仮にマグネットトルク向上のため磁石磁束を増加させると、最高誘起電圧も併せて増加してしまうため、仕様としての最高回転速度を低下させるか、駆動装置の耐圧設計を見直す必要がある。

したがって、このような仕様変更を加えないことを前提にすると、磁石磁束を増やすことができないため、このような条件で出力を向上させるためには、リラクタンストルクを向上させる必要がある。

3. 集中巻構造と分布巻構造のトルク特性比較

3.1 集中巻構造と分布巻構造について

この章では、リラクタンストルク向上のため、モータの巻線構造の違いによるトルク特性に着目し、検討した内容について述べる。

一般的に、IPMSMの巻線構造は、集中巻構造と分布巻構造の2種類に大別できる。集中巻構造は、一つのステータティースだけにコイルを巻回する単純な構造であり、コイルエンドを小さくしやすい長所がある。そのため、コイルエンドを含めた軸長が制約される用途で有利である。一方、分布巻構造は複数のステータティースにわたってコイルを巻回する複雑な構造であり、コイルエンドは大きくなりやすい。しかし、ステータで発生する回転磁界を正弦波に近づけることが可能で、高調波鉄損やトルクリプルの抑制を行いやすい。

次節から、両巻線構造のトルク波形やリラクタンストルク特性などを、二次元有限要素法解析の結果から述べる。

3.2 解析モデルの説明

図1に、検討に使用する集中巻構造IPMSM(以下“集中巻モータ”という。)と分布巻構造IPMSM(以下“分布巻モータ”という。)の解析モデルを示す。また表1に、両解析モデルの諸元を示す。

ロータ構造は8極のV字磁石型IPM(Interior Permanent Magnet)ロータで、両解析モデルで共通である。集中巻モータのステータは12スロット、分布巻モータのステー

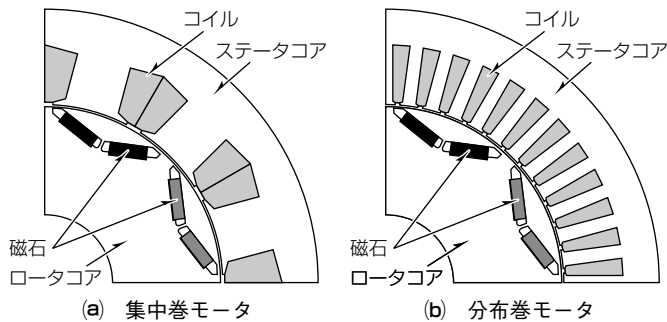


図1. 解析モデル

表1. 解析モデルの諸元

	集中巻	分布巻
極数	8	
スロット数	12	48
コイル巻数/スロット	60	15
直列導体数	60	
ステータコア直径	200.0mm	
ロータコア直径	129.0mm	
ギャップ長	0.5mm	
コア積厚	100.0mm	
磁石種類	ネオジム焼結磁石	
コア材料	積層電磁鋼板	
定格電流	150Arms	

タは48スロットである。その他直列導体数, ステータコア直径, ギャップ長, コア積厚などは全て共通にした。

3.3 トルク波形の比較

図2に, 集中巻モータと分布巻モータの解析モデルでのトルク波形を示す。電流の大きさは定格電流値, 電流位相角 β は 30° とした。また, 集中巻モータの平均トルクの大きさを1として規格化した。トルク波形の最大値に注目すると, 両モータの間に差はない。しかし, 最小値に注目すると, 分布巻モータの方が大きい。分布巻モータは, どのロータ回転角度でも, 比較的安定してトルクを発揮できていることが分かる。一方で集中巻モータは, 瞬時的に分布巻モータと同等の最大トルクを発揮できるが, 回転角度によってはトルクが大きく低下することが分かる。結果として, 平均トルクに大きな差になって表れている。

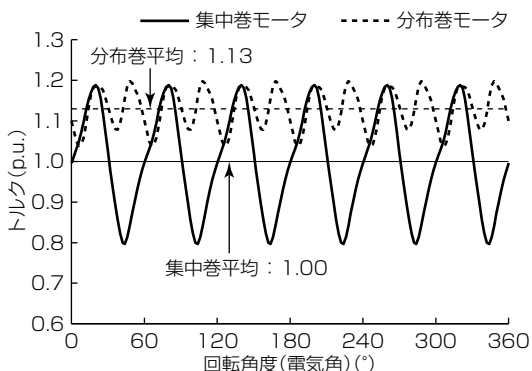


図2. 解析モデルでのトルク波形

3.4 リラクタンストルク波形の比較

図3に, 図1の各解析モデルから磁石を取り除き, 空隙とした“磁石なし”解析モデルを示す。この解析モデルの場合, ロータ内に磁石が存在しないためマグネットトルクは発揮されず, リラクタンストルクだけが発揮される。図4に, “磁石なし”解析モデルでのトルク波形を示す。電流の大きさは定格電流値, 電流位相角 β はリラクタンストルクが理論上最大になる 45° にした。磁石ありの場合と同様に, 最大値は集中巻モータと分布巻モータで差異が小さい一方で, 最小値は分布巻モータの方が大きい。結果として, 平均トルクは分布巻モータの方が大きくなっている。

これらの解析結果から, 集中巻モータのトルクが分布巻モータより低くなる原因は, 特定の回転角度でリラクタンストルクが瞬時的に低下するためと推測できる。

図4に示すとおり, 集中巻モータでリラクタンストルクが最小になる回転角度は電気角で 30° である。そのときの磁束の流れから, リラクタンストルクが低い理由を検討する。図5に, 集中巻モータと分布巻モータそれぞれの“磁石なし”解析モデルでの, 回転角度 30° のときの磁束密度分布と磁束線図を示す。まず, 図5(a)に示す集中巻モータの結果に注目すると, 片方のロータ極が二つのステータティースの中心に位置していることが分かる。このとき, ステータからロータに流入する磁束は, V字磁石の内

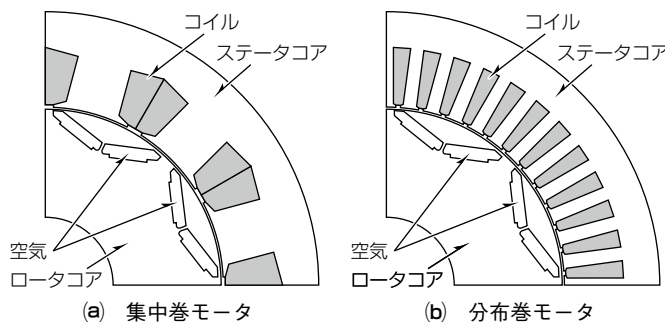


図3. “磁石なし”解析モデル

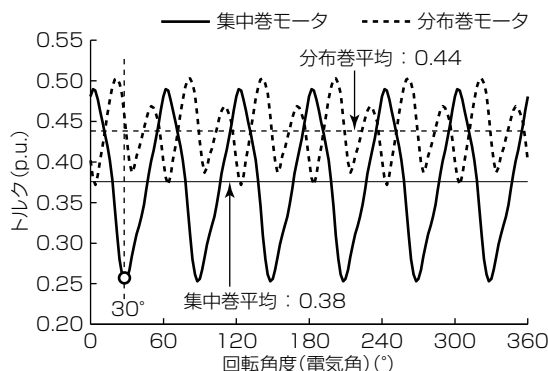


図4. “磁石なし”解析モデルでのトルク波形

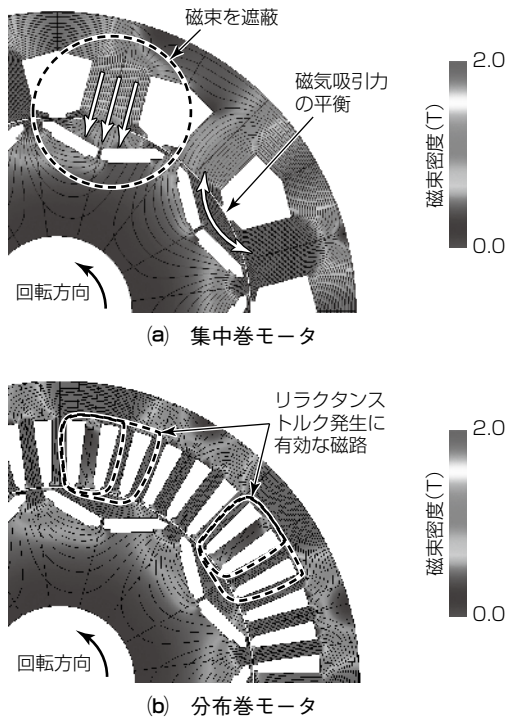


図5. “磁石なし”解析モデルでの磁束密度分布と磁束線図

側のコア領域を通過する経路を形成している。しかしながら、ロータコアの中心がステータティースの中心と一致しているために磁気吸引力が平衡し、トルクに寄与していないことが予想できる。さらに、もう片方のロータ極は、残り一つのステータティースと正対している。ステータからロータに流入しようとする磁束が、磁極の空隙に遮蔽されて、トルクに寄与していないことが予想できる。

一方で、図5(b)に示す分布巻モータの結果に注目すると、V字磁石の内側を通る磁束が非対称になっている。磁気吸引力が不平衡になり、トルクの発生に寄与していることが予想できる。さらに、隣接するロータ極でも同様の磁束経路が発生しており、全ての極で安定してリラクタンストルクを発揮できる構造になっていることが分かる。

この解析結果から、集中巻モータで特定の回転角度でリラクタンストルクが低下する理由は、ロータ・ステータ位置関係の対称性に起因する、磁気吸引力の平衡であることが明らかになった。

4. 非対称ロータ構造の検討

4.1 解析モデルの説明

3章で述べた磁気吸引力の平衡を解消するため、非対称ロータ構造に着目した。図6に、提案する非対称ロータ構造を備えた集中巻モータ解析モデルを示す。対称ロータ構造のトルク最小点での磁束経路の対称性を解消するため、

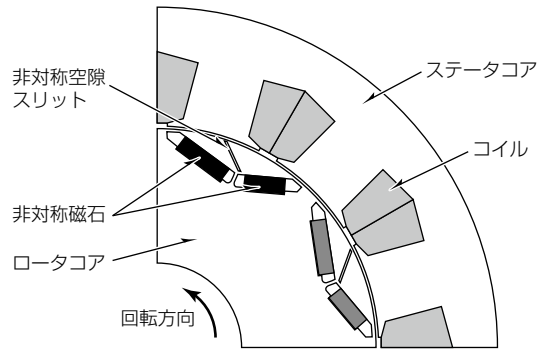


図6. 非対称ロータ構造集中巻モータの解析モデル

V字磁石の内側部分に斜めに傾斜した非対称空隙スリットを設置した。さらに、ステータからロータに流入する磁束を効率的にリラクタンストルクに寄与させるため、V字を構成する磁石辺の幅も非対称になるよう調整を加えている。

4.2 非対称ロータ構造のトルク特性

図7に、提案する非対称ロータ構造の“磁石なし”解析モデルでのトルク波形を示す。図4の解析と同様に、電流の大きさは定格電流値、電流位相角は 45° とした。

図8に、対称ロータ構造と非対称ロータ構造の“磁石なし”解析モデルでのトルクの平均値・最大値・最小値を比

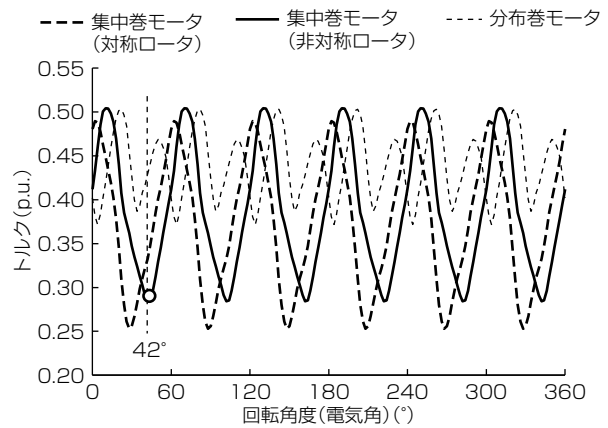


図7. 非対称ロータ構造の“磁石なし”解析モデルでのトルク波形

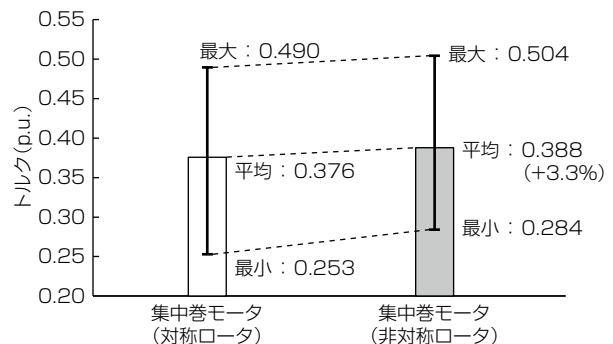


図8. 対称／非対称ロータ構造の“磁石なし”解析モデルでのトルク特性比較

較したグラフを示す。非対称ロータ構造は、従来の対称ロータ構造に比べて最小値が大きくなっていることが分かる。最大値も微増しており、結果としてトルクリプルは7.0%低減し、平均トルクは3.3%向上した。提案した非対称ロータ構造は、リラクタンストルクの向上に効果的であることが分かる。

図9に、提案する非対称ロータ構造の“磁石なし”解析モデルでの磁束密度分布と磁束線図を示す。図9(a)は対称ロータ構造でトルク最小値になる回転角度30°の図を、図9(b)は非対称ロータ構造でトルク最小値になる回転角度42°の図を示している。まず回転角度30°の様子に注目すると、対称ロータ構造で磁束経路が対称になっていた箇所、非対称空隙スリットによって変化が生じて、リラクタンストルクの発生に有効な磁路が形成されていることが分かる。この磁路によって、従来では発生していなかったトルクが発生していると推測できる。次に、回転角度42°の様子に注目すると、回転角度が進んだことによって、空隙スリットと片方の磁石辺で新たに作られたV字領域で、磁束経路が対称になっていることが分かる。このロータ極では、リラクタンストルクの発生は少ないと推測できる。しかし、もう片方のロータ極に注目すると、回転角度が進んだことによって、ロータ極とステータースの正対関係が解消されて、リラクタンストルクの発生に有効な磁路が形成されていることが分かる。従来は、隣接する極が同時にトルクを発揮できない状態に陥っていたが、非対称空隙スリットによってトルクを発揮できないタイミングをずら

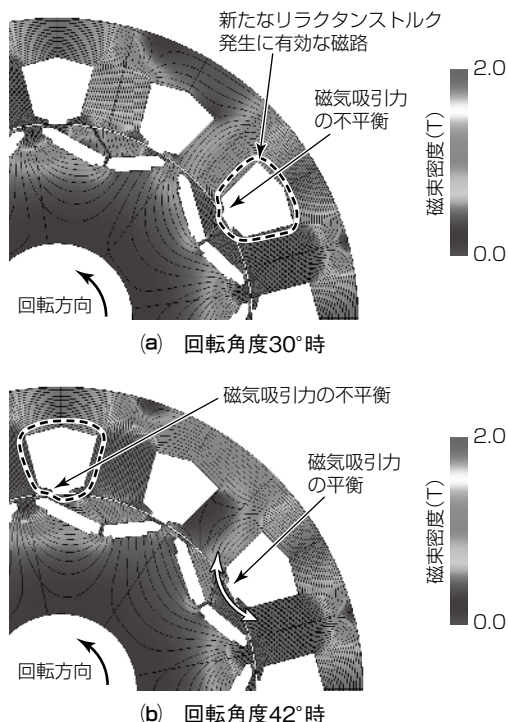


図9. 非対称ロータ構造の“磁石なし”解析モデルでの磁束密度分布と磁束線図

すことが可能になり、トルク最小値を向上させることが可能になった。

図10に、集中巻モータの“磁石なし”解析モデルでの電流位相角 β と平均トルクの関係を示す。最大トルクは非対称ロータ構造の方が大きく、リラクタンストルクの向上を達成している。

図11に、提案する非対称ロータ構造の“磁石あり”解析モデルでのトルク波形を示す。図2の解析と同様に、電流の大きさは定格電流値、電流位相角 β は30°とした。図12に、対称ロータ構造と非対称ロータ構造でトルク平均値・最大値・最小値を比較したグラフを示す。磁石がある場合

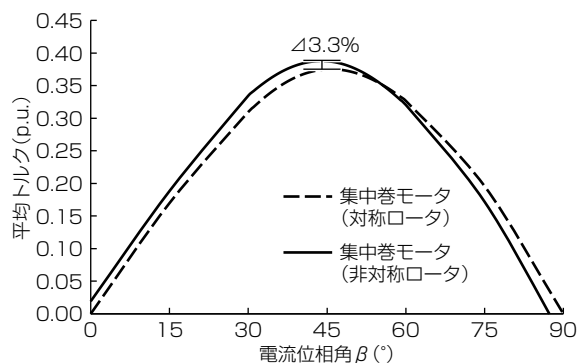


図10. “磁石なし”解析モデルでの電流位相角 β と平均トルクの関係

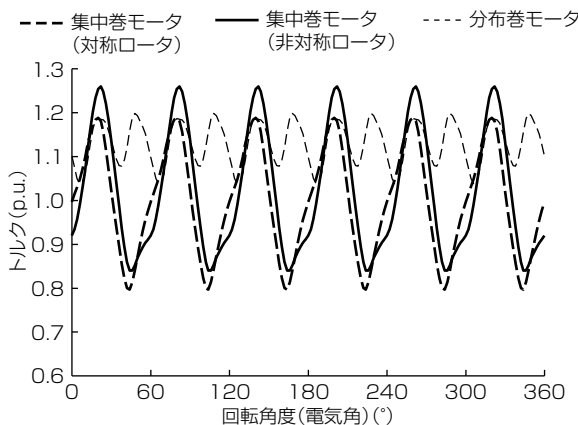


図11. 非対称ロータ構造の“磁石あり”解析モデルでのトルク波形

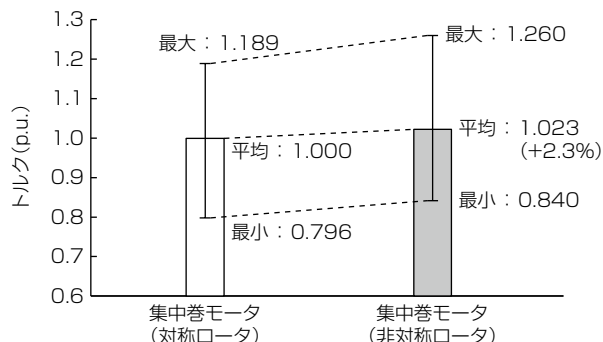


図12. 対称/非対称ロータ構造の“磁石あり”解析モデルでのトルク特性比較

でも、非対称ロータ構造は対称ロータ構造に比べてトルク最小値・最大値が大きくなっており、平均トルクは2.3%向上した。

図13に、集中巻モータの“磁石あり”解析モデルでの電流位相角 β と平均トルクの関係を示す。“磁石なし”解析モデルと同様に、最大トルクは非対称ロータ構造の方が大きくなっている。提案した非対称ロータ構造は、通常のトルクの向上にも効果的であることが明らかになった。また、図13には非対称ロータ構造の逆方向回転時の特性も併せて示している。逆転時は非対称空隙スリットがリラクタンストルクを減少させる働きを持つため、対称ロータ構造よりも低いトルクになっていることが分かる。

4.3 対称/非対称ロータ構造の出力特性比較

対称ロータ構造と非対称ロータ構造の諸特性解析結果を、それぞれ“①対称”“②非対称”として表2に示す。どの項目でも、対称ロータ構造の値を1として規格化した。

まず無負荷誘起電圧に注目すると、非対称ロータ構造は磁石とギャップの間に非対称空隙スリットを設置しているため、対称ロータ構造より無負荷誘起電圧が低くなっている。すなわち、非対称ロータ構造は磁石磁束が低下しているにもかかわらず、リラクタンストルク向上によって対称ロータ構造以上のトルクを発揮できていることが分かる。

次に最大出力に注目すると、非対称ロータ構造は最大トルクと同程度の割合で向上していることが分かる。ここで、最大トルクを対称ロータ構造と同等になるよう、コイル巻数を減らした場合の解析結果を“③非対称コイル巻数減”として表2に示す。これによって、モータの逆起電力を抑制し、より高い回転速度まで従来の対称ロータ構造と同等の最大トルクを発揮可能になる。さらに、コイル巻数を減じたことによって巻線1本当たりの断面積を大きくでき、電流密度が低下した。これに対して、電流密度を従来と同等とし、ステータのコイル領域を小さくしてロータ直径を増

表2. 対称/非対称ロータ構造の諸特性

	①対称	②非対称	③非対称/ コイル 巻数減	④非対称/ コイル巻数減/ ロータ直径増加
コイル巻数/スロット	60	60	58	58
ロータ直径(mm)	129.0	129.0	129.0	130.6
電流密度(p.u.)	1.00	1.00	0.97	1.00
無負荷誘起電圧(p.u.)	1.00	0.98	0.95	0.93
最大トルク(p.u.)	1.00	1.02	1.00	1.00
最大出力(p.u.)	1.00	1.02	1.05	1.09

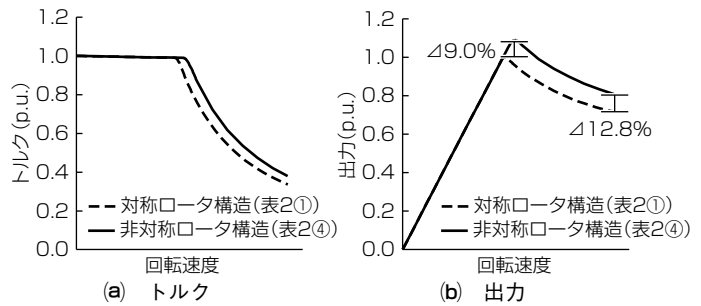


図14. 回転速度に対するモータ特性

加させた場合の解析結果を“④非対称コイル巻数減ロータ直径増加”として表2に示す。より大きなリラクタンストルクを発揮することが可能になり、9%の最大出力向上を達成した。

図14に、対称ロータ構造(表2①)と最終提案の非対称ロータ構造(表2④)の回転速度-トルク曲線及び回転速度-出力曲線を示す。低速域での最大トルク・出力は同等であるが、高速域では非対称ロータ構造の方が高く、最高回転速度での12.8%の出力向上を達成している。

最終提案構造では、依然として誘起電圧の制約に余裕がある。この提案モータに、油-水熱交換器を備えた油を用いた高効率な冷却構造を併用することで、磁気特性が高いものの高温での使用ができなかった磁石の使用を可能にした。結果として、更に出力密度を向上させて、世界最高クラスのモータ出力密度23kW/Lを達成した。

5. むすび

集中巻構造IPMSMのリラクタンストルクが分布巻構造IPMSMに比べて小さい理由を二次元有限要素法解析によって検討し、特定の回転角度で発生する磁気吸引力の平衡が原因であることを明らかにした。リラクタンストルクを向上させるため、磁石の前に傾斜した空隙スリットを設ける非対称ロータ構造を提案した。特定の回転角度での磁気吸引力の平衡を解消し、リラクタンストルクを向上させる効果があることを明らかにした。これらの技術と冷却構造の改善によって、世界最高クラスのモータ出力密度23kW/Lを達成した。今後は、更なる高出力密度化に向けて、技術開発を推進していく。

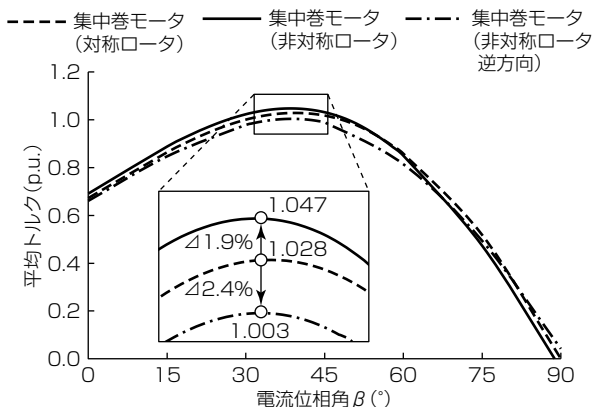


図13. “磁石あり”解析モデルでの電流位相角 β と平均トルクの関係