

高巻線係数と高占積率を両立する新しい巻線構造を持つ永久磁石同期モータ*

Novel Motor That Has a High Winding Factor and a High Slot Fill Factor

牧田 真治
Shinji MAKITA

伊藤 靖英
Yasuhide ITO

青山 知弘
Tomohiro AOYAMA

道木 慎二
Shinji DOKI

In this paper, we propose a novel motor that has a high winding factor and a high slot fill factor. A motor with concentrated windings has a high slot fill factor, but a low winding factor. On the other hand, a motor with distributed windings has a high winding factor, but a low slot fill factor. To incorporate the advantages offered by both the aforementioned types of motors, our proposed motor includes a new distributed winding stator, which can be flat band-shaped without dividing the windings, and can be easily wound.

Key words :

winding factor, band-shaped stator, slot fill factor, PMSM

1. まえがき

モータは、家電機器、自動車、産業機械等において基本コンポーネントの1つであり、小型化、低コスト化、高効率化、用途別最適化、生産性向上など絶え間のない研究開発が進められている。

現状のモータの多くは、一つのステータ磁極に巻線を巻く集中巻構造と、複数のステータ磁極をまたいで巻線を巻く分布巻構造のどちらかである。集中巻構造は高占積率が容易であるものの、通常の1極対あたり3スロットを持つ集中巻モータでは、巻線ピッチが電気角120度となるため巻線係数が0.866と低い。また1極対あたりのスロット数が分数となるスロットコンビネーションも提案されており集中巻モータでありながら巻線係数を向上させることが可能であり、例えば14極15スロットや16極15スロットでは0.951という巻線係数を実現可能である¹⁾。しかしなが

らこのようなスロットコンビネーションは構造的に機械角180度の周期性を持たないためアンバランス力が発生し振動や騒音の原因となる²⁾。アンバランス力が発生しない組み合わせの例としては10極12スロットや14極12スロットがありその巻線係数は0.933である³⁾。このようなスロットコンビネーションは通常の1極対あたり3スロットを持つ集中巻モータに対して極数が多くなる傾向にあり、鉄損の増加やロータ磁石磁束の短絡増加といった課題が発生し、必ずしも巻線係数に比例した性能向上が期待できるとは限らない。

一方分布巻構造は巻線ピッチが120度よりも大きくなるため巻線係数が0.966～1.000と高い。しかしながら複数の相の巻線が重なるため占積率の向上、コイルエンドの短縮の点で集中巻構造に劣る。この問題を解決する手段として、巻線をセグメントに分割しスロットに挿入後溶接でつなげる方法⁴⁾や、角線の成形巻線を一括挿入する方法⁵⁾が実用化されているが、スロ

* (一社)電気学会の了承を得て、論文誌D Vol.134 No.12 P1031-1037 より一部加筆して転載

ットに入る導体数やスロット形状に制約があり、適用用途は限定される。

本報告では、高占積率化、コイルエンドの短縮が可能という集中巻の特徴と、巻線係数が高いという分布巻の特徴とを両立させる新しいモータを提案し、実際に設計、実機製作評価を行った結果について述べる。具体的には、帯状に展開したステータコアに多導体の分布巻の巻線を巻き、丸めるという製造方法と、それを巻線の分割なしに実現するための新しいステータ磁極及び巻線配置である。本技術により、1極対あたりのスロット数が分数となる集中巻よりも少ない極数にて同等の巻線係数を実現でき、またスロットに入る導体数やスロット形状の制約を受けることなく高占積率化を実現でき、小型化が可能となる。

2. 提案モータの構造、原理及び特徴

2.1 提案モータの基本構造、製造方法

Fig. 1に提案モータのステータの基本構造、製造方法を示す。スロット間をつなぐ線は巻線を示しており、線種の違いは相を示している。本図は8極のモータの例である。Fig. 1 (a)のように帯状に展開したステータコアに複数のステータ磁極を囲むように巻線を巻き、それを丸めて端部を溶接することにより Fig. 1 (b)のようなステータを構成する。ステータ磁極は不等幅、不等ピッチとなっており、巻線は隣接する巻線が径方向に重なる箇所と重ならない箇所が存在する。巻線が径方向に重ならない箇所のうちの一つを帯状に展開したステータコアの端部に配置することにより、巻線を分割することなく巻くことを可能としている。

このような構成とすることにより、巻線のピッチが120度よりも大きくなり、巻線係数を向上させることが可能となる。また帯状に展開したステータコアに巻くことにより高占積率、コイルエンドの短縮の実現が容易となる。さらにコア材料歩留まりの向上といったメリットも発生する。

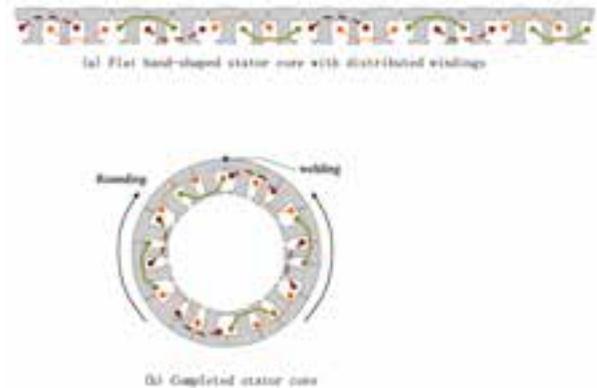


Fig. 1 Basic structure and a manufacturing method of a proposal motor (8 poles)

2.2 短節化の考え方

まず提案モータのステータ磁極の幅、ピッチの考え方を、全節巻と比較しながら示す。Fig. 2 (a)は全節巻時の巻線配置の一部である。巻線は径方向に重なる箇所を中心に2相分を示している。一つのステータ磁極ピッチは電気角で60度であり、それぞれの巻線は3つのステータ磁極を囲むように巻かれているので180度ピッチとなる。またそれぞれの相の位相は電気角で120度ずれており、図示されないもう1相と合わせて3相モータを構成している。この場合、全ての巻線が互いに径方向に重なっているため、帯状に展開したステータコアに巻線を巻くには端部の巻線を分割する必要が出てくる。導体数が少ない場合は端部にて分割された巻線を、ステータコアを丸めた後に溶接等で接続することも可能であるが、導体数が多く高密度に巻く場合にその方法を適用するのは難しい。

この問題を解決するために、部分的に巻線を短節化することにより巻線の径方向への重なりをなくし、その短節部を展開したステータコアの端部に配置することで、端部における巻線の分割を回避することを考える。

Fig. 2 (b)はステータ磁極形状をそのままに隣接する2相の巻線を互いに径方向に重ならないように短節化した状態を示している。この場合それぞれの巻線は2つのステータ磁極を囲むように巻かれるので磁極ピッチは120度、またそれぞれの巻線の位相がFig. 2 (a)に対して30度進遅角することになるため、この巻線のみに着目した部分的な巻線係数は、巻線ピッチから決まる短節巻係数が0.866、位相から決まる分布巻

係数は0.866となり、巻線係数はその積である0.750となる。これにより巻線の周方向への重なりをなくすることができるが、中央のステータ磁極に流れる磁束はどの巻線にも鎖交しないため、その分の性能低下が0.750という巻線係数に表れている。

そこで Fig. 2 (c) に示すように、Fig. 2 (b) で巻線を巻かれない中央のステータ磁極を2分割し隣接する左右のステータ磁極に統合するようにステータ磁極形状を変更する。中央のステータ磁極のピッチ60度のうちの30度分を隣接する左右のステータ磁極に分配することとなるため、これにより磁極ピッチは150度になり、巻線の位相も15度の進遅角となる。この巻線のみに着目した部分的な巻線係数は、短節巻係数は0.966、分布巻係数は0.966、巻線係数は0.933となる。中央のスロットには異なる2つの巻線が入り互いに径方向に重ならないように巻くことが可能であるので、高い巻線係数を確保しながら、巻線の分割を回避することができる。

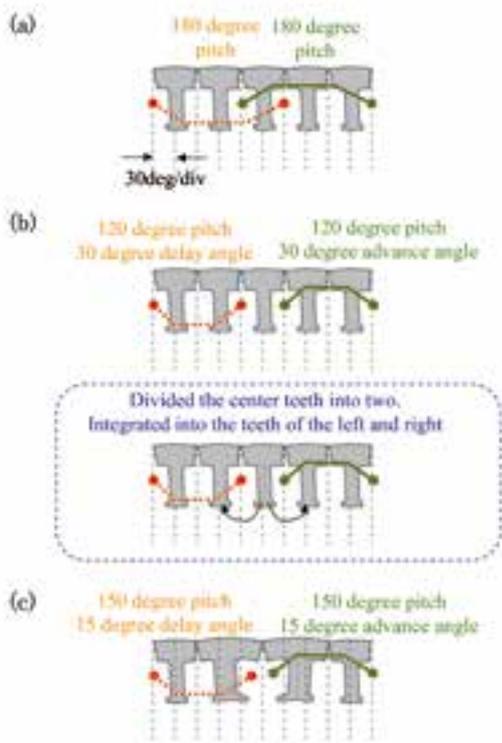


Fig. 2 Proposal arrangement of stator teeth and windings

2.3 短節部の配置の考え方

次に前節にて示した短節部の配置について説明する。Fig. 2 にて示した短節化は2相の巻線になされ、それぞれの巻線が進角側、遅角側にずれるため、短節箇所を1箇所とすると3相の誘起電圧位相が120度位相差にならない。3相バランスを確保するためには各相が少なくとも1組の進角側にずれた巻線と遅角側にずれた巻線をもつ必要があり、そのためにはFig. 2 (c) に示す短節箇所を3箇所、その相の組み合わせが互いに異なるようにすればよい。

Fig. 3 に8極時の例を示す。8極24スロットの場合において機械角0度位置、120度位置、240度位置の巻線およびステータ磁極をFig. 2 (c) の考え方に従い変形する。0度位置の変形によりU相巻線が進角側に、W相巻線が遅角側にずれ、120度位置の変形によりV相巻線が進角側に、U相巻線が遅角側にずれ、240度位置の変形によりW相巻線が進角側に、V相巻線が遅角側にずれ8極21スロットとなることわかる。各相が進角側、遅角側にずれた巻線の一つずつ持つこととなり、これらの合成によって発生する誘起電圧における基本波の位相は8極24スロットと同じである。また誘起電圧の振幅は巻線係数1.000となる180度ピッチの巻線が2つと、150度ピッチ進角15度、150度ピッチ遅角15度の巻線が一つずつとなるため、これらをベクトル的に合成すると0.966となる。これが巻線係数に相当する。

しかしながら短節箇所を3箇所とすると3相のバランスは確保できるものの、ステータ形状および巻線配置の周方向の周期性は360度となるため、トルク発生時のロータとステータとの間のラジアル力にアンバランスが発生し、振動や騒音が増大することが懸念される。そこで上記3相バランスに加え、ラジアル力をバランスさせるために、短節箇所を6箇所とし、同一相の組み合わせとなる短節箇所を機械角で180度の位置に配置することとする。

Fig. 3 で示したステータに対して適用した結果をFig. 4 に示す。Fig. 3 の8極21スロットの形状からさらに60度、180度、300度の位置をFig. 3 (c) の考え方に従い変形する。60度位置の巻線組み合わせは240度位置の巻線組み合わせと同一であり、これらは

180度対向位置にあるのでラジアル力をバランスさせることが出来る。同様に180度位置の巻線組み合わせと0度位置の巻線組み合わせ、300度位置の巻線組み合わせと120度位置の巻線組み合わせとが同一であるので、この配置によりラジアル力バランスを確保できる。この時の各相の巻線は150度ピッチ進角15度、150度ピッチ遅角15度の巻線が2つずつとなり、これらをベクトル的に合成すると0.933となる。これが巻線係数に相当する。



Fig. 3 Deformation from 24slots/8poles stator to 21slots/8poles stator



Fig. 4 Deformation from 21slots/8poles stator to 18slots/8poles stator

2.4 提案モータの設計

次に提案モータの設計について示す。前節にて示すようにモータの3相バランスとラジアル力バランスを確保するためには進角巻線と遅角巻線が最低限2セット必要であり、1つの巻線に1つの極対が対応するため、提案モータの最小極数は8となる。多極化する場合は、8極に対応する進角巻線と遅角巻線の2セットに全節巻線を追加することとなるが、3相分の全節巻線を追加するには4極が必要となるため、極対数は4, 6, 8...という8極以上の4の倍数の極数となる。またスロット数は全節集中巻のスロット数に対して6箇所の磁極の統合により6スロット少ない値となる。

Fig. 5にスロット、ステータ磁極の詳細形状の考え方を示す。2相の巻線が入る6つのスロットは、巻線スペース利用率を最大化するために他のスロットの2倍の面積となるように決定する。スロット形状に関し

ても他のスロット形状を周方向に反転して並べた形状に近いことが望ましい。この2相の巻線が入るスロットの周方向両側に太いステータ磁極が配置されるが、このステータ磁極の周方向幅はFig. 2に示す考え方より1.5倍となる。ただしここで示したのは目安であり、実際には磁気飽和を考慮した詳細設計や製作上の都合を考慮して設計する必要がある。

Table 1に極数とスロット数および巻線係数との関係について示す。3相バランスおよびラジアル力バランスを確保するための短節巻線は、極数に関わらず1相あたり4つでよいので、極数が多いほど全節巻線の数の比率が上がり、巻線係数を向上させることができる。

Table 1 Relation of pole, slot combination and winding factor

Number of poles	Number of slots	Number of full pitch windings per phase	Number of short pitch windings per phase	winding factor
8	18	0	4	0.933
12	30	2	4	0.955
16	42	4	4	0.967
20	54	6	4	0.973
24	66	8	4	0.978
28	78	10	4	0.981

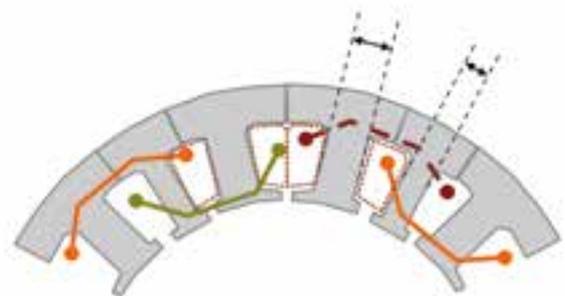


Fig. 5 Detail design of the proposal motor

2.5 解析による原理検証

前節までにて示した考え方を検証するために、同一ロータにてステータのみを変更した解析を実施し諸特性を比較した。Table 2に検証用モータの仕様を、Fig. 6に各ステータの形状およびトルク発生時の磁束密度分布を示す。8極24スロットのステータ磁極は均等幅均等配置であるのに対し、8極21スロット、8極18スロットは不均等幅不均等配置となっていることを確認できる。また8極21スロットのステータ形

状の電磁氣的周期性が機械角で360度であるのに対して、8極18スロットでは周期性が機械角で180度であることを確認できる。

Fig. 7に8極18スロットの3相誘起電圧波形を示す。各相の誘起電圧波形は同一であり、またその位相差は電気角120度となっており、通常の3相モータと同様であることが分かる。Fig. 8に誘起電圧1相分について巻線毎の誘起電圧を示す。電気角15度進角している誘起電圧と、電気角15度遅角している誘起電圧が合成されて1相分の誘起電圧となっていることが分かる。誘起電圧の位相差が異なる巻線で相を構成しているため、設計上並列巻線を採用する場合には循環電流が発生しないように、少なくとも進角巻線と遅角巻線1セットを直列にする必要がある。

Table 3に8極24スロット、8極21スロット、8極18スロットの誘起電圧基本波成分振幅と巻線係数との関係を示す。波形は図示しないがFig. 7とほぼ相似形であり、振幅は巻線係数の比率とほぼ一致していることが分かる。

Fig. 9に8極24スロット、8極21スロット、8極18スロットのロータ、ステータ間に発生する無通電時の電磁力の軌跡を示す。8極21スロットのみ両者間に電磁力が発生しており、前節で示したようにこの構成ではラジアル力のアンバランスが発生していることが分かる。

Fig. 10に8極24スロット、8極21スロット、8極18スロットのコギングトルク波形を示す。波形の基本次数成分は同じであり、8極18スロットは8極24スロットに対してコギングトルクが82%減の値となっている。短節化により各ステータ磁極の位置および幅が不等となったことが原因と推測される。

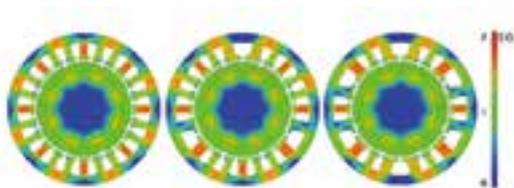


Fig. 6 Magnetic density distribution of 24slots/8poles machine, 21slots/8poles machine, 18slots/8poles machine

Table 2 Specification of the verification motors

Item	Value
Number of poles	8
Number of slots	24,21,18
Rotor type	SPM
Winding turn per phase	16
Stator outer diameter [mm]	40
Rotor diameter [mm]	24
Stack length [mm]	30.5
Air gap length [mm]	0.8

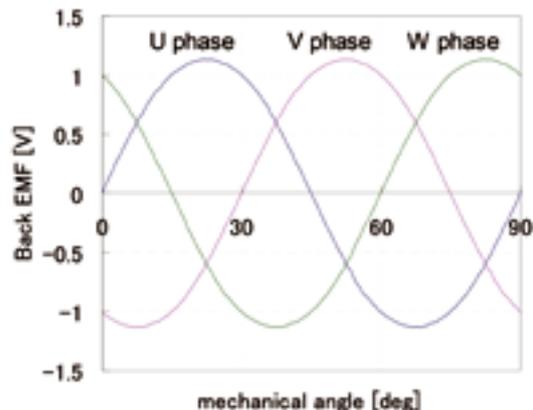


Fig. 7 Back EMF waveforms (18slots/8poles)

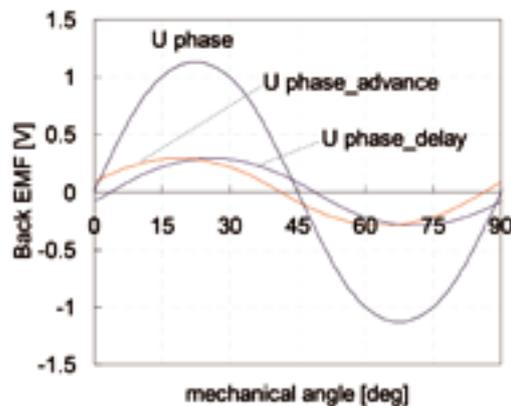


Fig. 8 Back EMF waveforms of each winding (18slots/8poles)

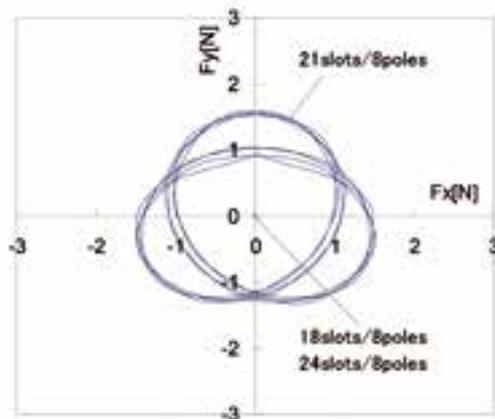


Fig. 9 Radial force trajectory of three types of machines

Table 3 Comparison of the amplitude of back EMF with winding factor

Stator	Back EMF [V]	Back EMF Ratio	Winding Factor
24slots/8poles	1.237	1.000	1.000
21slots/8poles	1.197	0.968	0.966
18slots/8poles	1.157	0.935	0.933

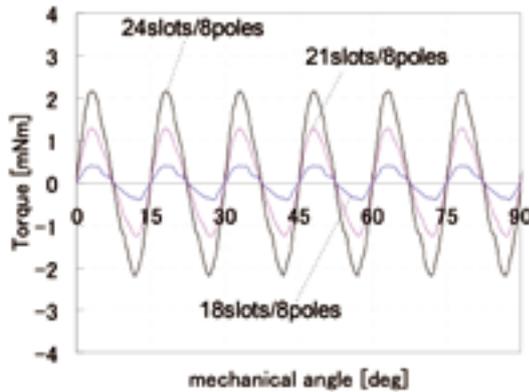


Fig.10 Cogging torque waveform of three types of machines

2.6 試作品による原理検証

前節に示したモータを試作し解析との整合性を確認した。提案モータのコンセプトは展開コアにすることによる高占積率巻線の実現であるが、本節ではステータ製作時の性能ばらつきの影響を排除するため一体コアにて製作し、誘起電圧およびコギングトルクについて評価した。

Fig. 11 に各相の 1000rpm における誘起電圧の測定結果を示す。解析値同様各相の誘起電圧波形は同一であり、またその位相差は電気角 120 度となっており、通常の 3 相モータと同様であることが分かる。また Table 4 に示すように各ステータの誘起電圧振幅は解析同様、巻線係数の比率とほぼ一致していることを確認した。コギングトルクについては Fig. 12 に示すように構造起因による低次の変動成分が重畳しているものの、解析同様 8 極 18 スロットが最も小さい値となっていることが分かる。

Table 4 Comparison of the amplitude of back emf with winding factor

Stator	Back EMF [V]	Back EMF Ratio	Winding Factor
24slots/8poles	1.178	1.000	1.000
21slots/8poles	1.141	0.969	0.966
18slots/8poles	1.103	0.937	0.933

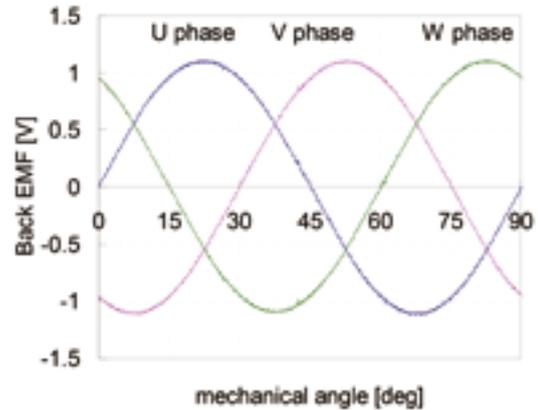


Fig.11 Back EMF waveforms of each winding (18slots/8poles)

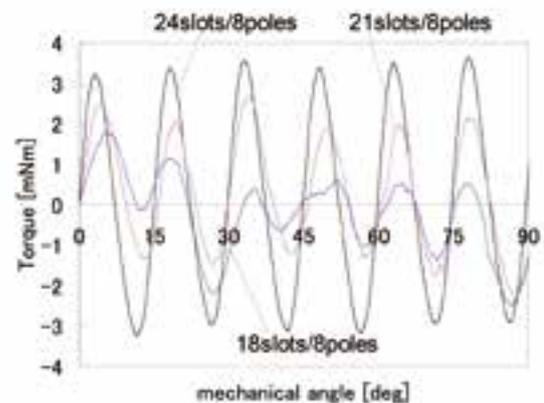


Fig.12 Cogging torque waveform of three types of machines

3. 提案モータの設計、評価

3.1 試作モータの設計、製作

前章にて提案した技術を用いたモータの設計、製作を実施した。ステータは前章にて示した検証用試作品の 8 極 18 スロットと同一ステータ形状にて、高占積率化を試みた。ロータについても前章にて示した 8 極 SPM 構造を採用した。Fig. 13 に示すように展開状態のコアを積層し、その状態に成形した巻線を外周側巻線、内周側巻線の順に挿入し、巻線を挿入した展開コアを丸め、端部を溶接するという手順にて実施した。Fig. 14 に完成したステータの概観を示す。分布巻でありながら導体占積率 70%、コイルエンド片側 6mm を実現している。



(a) Laminated stator core



(b) Stator core after inserting formed distributed windings



(c) Bent stator core with windings

Fig. 13 Process of manufacturing a prototype motor



Fig. 14 Stator overview of a prototype motor

3.2 測定結果

Fig. 15 に電圧一定時のトルクと回転数との関係を示す。破線が解析値を実線が実測値を示している。試作モータにおいてはステータコアを丸めやすくするため、バックヨーク内周側にスリットを入れており、解析値に対して若干の性能低下があるものの概ね解析値通りの性能を確認した。また最大効率は70%であった。

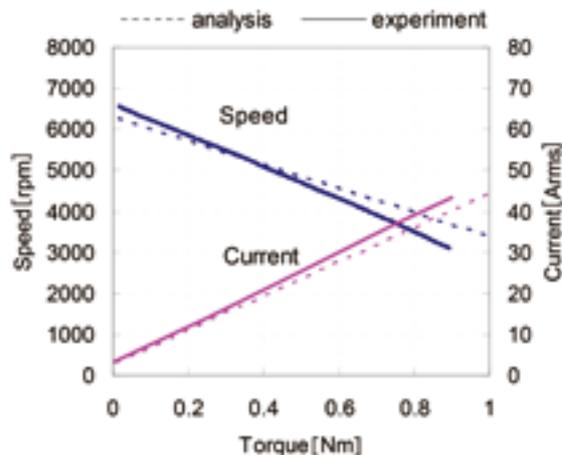


Fig. 15 Measured torque-speed characteristic (DC 13V)

3.3 従来モータとの比較

提案モータの性能ポテンシャルを把握するために、同一性能の集中巻モータとの体格比較を実施した。同一ステータ外径、ロータ外径にて誘起電圧と巻線抵抗が同一となるようにコア積厚を変更した時のコイルエンド込みの体格を比較したところ、Table 5 のようになり、一例ではあるが8%程度の小型化を実現できることを確認した。巻線係数は同等でありながらもより少ない極数にて高い巻線係数を得られることと、巻線占積率の向上が体格低減に寄与している。

Table 5 Comparison with conventional motor

	Proposal motor	Conventional motor
Volume [mm ³]	53407	58057
Stator diameter [mm]	40	40
Rotor diameter [mm]	24	24
Core axial length [mm]	30.5	39.2
End coil length [mm]	6	3.5
Number of poles	8	14
Number of slots	18	12
Slot fill factor	70%	60%

4. むすび

帯状に展開したステータコアに多導体の分布巻の巻線を巻き、丸めるという製造方法と、それを巻線の分割なしに実現するための新しいステータ磁極及び巻線配置を考案し、その基本的な考え方を明らかにした。提案したモータはその特徴として、高巻線係数と高占

積率, コイルエンドの短縮を両立可能であることがあげられる。

更に本論文では, その設計例を示し, 実際に設計, 製作評価を行い導体占積率70%, コイルエンド片側6mm, 巻線係数0.933を確認し, 小型化のポテンシャルを明らかにした。今後, 提案モータの更なる特性改善と製造面を含めた実用検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 赤津観, 涌井伸二:「巻線係数とインダクタンス係数を用いた多極多スロット集中巻SPMSMの簡易設計手法」, 電気学会論文誌D, Vol.127, No.11, pp.1171-1180 (2007)
- 2) P. Ponomarev, P. Lindh, J. Pyrhonen: "Effect of Slot-and-Pole Combination on the Leakage Inductance and the Performance of Tooth-Coil Permanent-Magnet Synchronous Machines," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 60, no. 10, pp. 4310-4317, (2013)

- 3) Z. Q. Zhu, M. L. Mohd Jamil, L. J. Wu: "Influence of Slot and Pole Number Combinations on Unbalanced Magnetic Force in PM Machines With Diametrically Asymmetric Windings," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 49, no. 1, pp. 19-30, (2013)
- 4) H. Ishikawa, A. Umeda, M. Kohmura: "Development of a More Efficient & Higher Power Generation Technology for Future Electrical Systems," SAE International Convergence 2000 International Congress on Transportation Electronics, (1999)
- 5) 石上孝, 田中雄一郎, 本間博:「角線重ね巻ステータとその自動製造プロセスの開発」, 電気学会論文誌D, Vol.132, No.10, pp.976-982 (2012)

著者



牧田 真治

まきた しんじ

モータ先行開発部 博士(工学)
モータ関連の要素技術開発に従事



伊藤 靖英

いとう やすひで

モータ先行開発部
モータ関連の要素技術開発に従事



青山 知弘

あおやま ともひろ

視界開発部
リアワイパモータの開発に従事



道木 慎二

どうき しんじ

名古屋大学大学院工学研究科情報・通信
工学専攻 教授
モータやロボット等の制御の研究に従事