

高占積率平角線コイルを用いた 直接駆動型同期電動機の高トルク密度化

山元 雄太（東京大学），川上 貴紀（信州航空電子），古関 隆章*（東京大学）

High Torque Density Design of a Direct Driven Synchronous Motor Using Flat-type Armature Windings
Yuta Yamamoto (The University of Tokyo), Takaki Kawakami (JAE Shinshu, Ltd.), and
Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. 緒言

近年、燃料費高騰による省エネルギー化とランニングコストの低減の必要性から各方面で電気推進システムが注目を集めている。この流れは船舶分野に関しても共通で、国際海事機関(IMO)が2013年1月から自動車の燃費基準に相当する EEDI と呼ばれる環境規制を新造船に対して開始するなど、より一層のエネルギーの利用効率の向上が求められている。船舶分野における省エネルギー施策は、摩擦抵抗の低減、船舶推進の高度化、運航および操船の効率化に大別されるが、筆者らは船舶推進の高度化に注目し、要求される低速高トルクの性能を満たす直接度駆動型の主電動機的设计、提案、実機検証を行ってきた⁽¹⁾。そこで、船舶特有の要求を満たすために極ピッチの調整が容易で高トルク密度の達成が可能な横方向磁束型を採用した⁽²⁾。しかし、従来試験機の問題点として小径丸線による多巻線の構成であったことから、点接触による放熱性の悪さと相まって大電流を流せず、多極構成による大きなトルク定数を生かしきれなかった。また、インダクタンスが大きく、結果として力率が低下しがちであった。そこで、従来機の問題点を解決し、高トルク密度と高力率を両立すべく、昨今実用化しつつある平角線コイルに注目し、設計に生かしてその優位性を検証する。

2. 新試験機的设计と平角線の位置付け

設計は、⁽³⁾にて報告したパーミアンス法とトルク簡易設計法による大まかな設計の後、汎用電磁界解析ソフトである JMAG を用いた数値解析により詳細部を詰める手順で効率的に実施した。なお、設計目標は既存の推進モータを考慮し、トルク密度 10kNm/m^2 、力率 >0.80 に設定した。図1には、数値解析用モデルを示す。

今回、従来機の問題点を解決すべく平角線を採用してコイル製作を行った。平角線により図2に示すように、面接触になるため表面積に比例する熱抵抗を低減と大径化による少巻数によってより大きな電流を流せるほか、インダクタンス分が減少し力率向上が期待できる。また、同一電機子起磁力を得るのに丸線よりも小型化できるため、トルク密度向上効果が得られる。

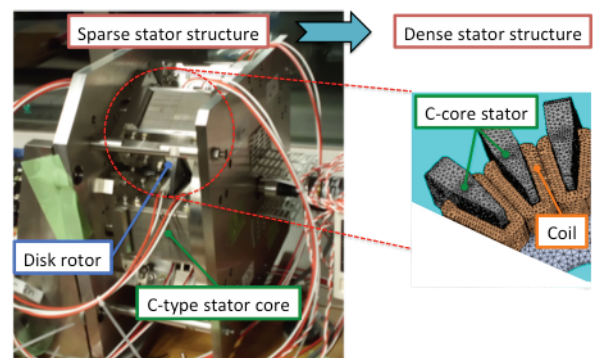


図1 従来試験機の構成と新型機の有限要素法解析モデル
(要素数: 886,736, 節点数: 238,128)

Fig.1 Structure of previous machine and model of proposed machine for finite element analysis (FEA)
(886,736 elements, 238,128 nodes)

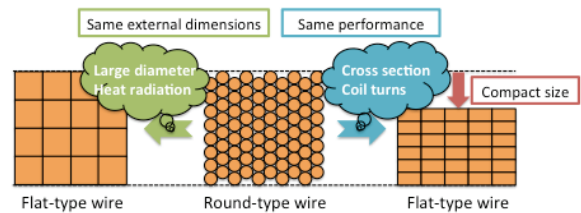


図2 平角線のメリット

Fig.2 Advantages of flat-type wire compared to round type.

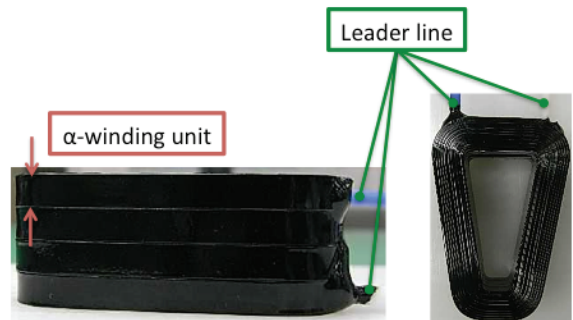


図3 開発した平角線の外観

Fig.3 Outside appearance of produced flat-type wire.

表1 導入した平角線コイルの性能諸元

Table 1 Characteristics of introduced flat-type windings

Item	Requirement	Product
Cross section of conductor	1.0 mm ²	1.15 mm ²
Coil width	7.2 mm	7.15 mm
Coil depth	17.5 mm	17.1 mm
Coil space factor	> 80 %	86.5 %
Cross section of coil	> 100 mm ²	122 mm ²

コイルの設計目標は 7.2mm×17.5mm (幅×高さ)程度の空間で、導体断面積 1mm²程度の線材にて占積率 80%以上として開発した。図3には製作したコイルの外観を、表1には基本特性比較を示す。図3に示すように、4個のα巻コイルの積層にて実現した。また、通常の表面皮膜に加え、コイル内側のティースと接触部分の保護強化の目的で、コイル全体に絶縁塗装実施した。表1に示すように要求仕様を満たす平角線コイルの開発に成功した。

表2には、図1の解析モデルを用い、詳細部を詰めた後の実機製作前の最終的な設計完了した時点で従来機と比較したものを示す。従来機の各値は実験にて測定した値⁽⁴⁾である。他方、新試験機の各値はインダクタンスを森本ら⁽⁵⁾の手法を数値解析的に算出した以外は理論式をベースに計算したものである。また、定格力率に関しては、本モータが非突極機であることを考慮して、*d*軸電流0制御を仮定して計算したものである。表2で示したように、漏れ磁束に注意しながらステータ構造の高密度化⁽³⁾及び平角線採用により丸線と比較して少巻線化が可能となったことでより大きな電流を流せるようになったほか、低インダクタンスを実現した。また、定格速度の見直しによる極数変更も併せて実施したことが奏功して目標を超える高力率が達成した。

他方で、巻線部の占積率が 30%弱増加したことでモータ体格の小型化を実現した。したがって、電流密度は従来機と比べ 70%程度で巻線に無理のない余裕を持った低電流密度設計ながらも、2倍以上の高トルク密度化を実現した。

表2. 従来機と新試験機の性能比較

Table 2. Comparison of characteristics between previous and proposed prototype models.

Item	Previous	Proposed
Number of poles	50 poles	20 poles
Armature resistance	8.06 Ω	2.16 Ω
<i>d</i> -axis/ <i>q</i> -axis inductance	99.4 mH	17.9 mH
Rated current density	5.0 Arms/mm ²	3.5 Arms/mm ²
Conductor cross section	0.283 mm ²	1.15 mm ²
Coil space factor	58.5 %	86.5 %
Rated power factor	0.757	0.975
Torque density	5.5 kNm/m ²	12.0 kNm/m ²

3. 結言

本論文では、筆者らが提案してきた横方向磁束型低速高トルクモータ向けの高占積率を有する平角線コイルの開発について述べた。提案したコイルを設計に生かすことで従来機において問題であった低力率及び低トルク密度を克服し、当初想定した目標を大きく超える定格力率 0.975、トルク密度 12kNm/m²を実現できる可能性を示した。

種々の材料が高性能化しつつある中で、電気機器においてトルクを生み出すのに本質的に必要な巻線ではその扱いやすさやコストから丸線が利用されることが多いが、成型技術も着実に進歩し、電気機器のより一層の省エネルギー化と高性能化の実現という相反関係を緩和し、なおかつ、小型化を図る上では巻線の選択は解決策の一つとして極めて肝要である。

現在、実機を製作中であり、完成後は図4に示すような実験系により、新試験機の設計仕様の確認及び従来機と比較した場合の優位性を明らかにする予定である^{(4),(6)}。

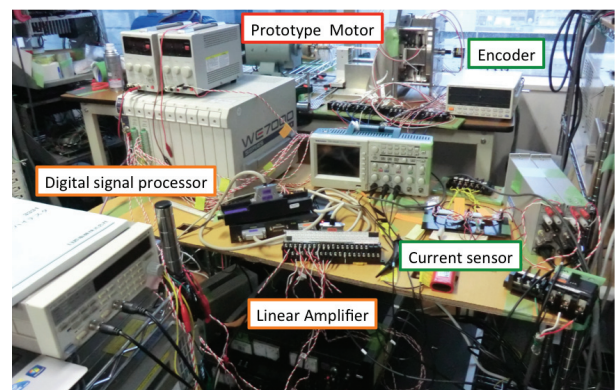


図4 従来機における実験系の構成⁽⁴⁾

Fig.4 Experimental setup in the previous machine⁽⁴⁾.

文献

- (1) T. Nakamura *et al.*: "A low-speed high-torque permanent magnet synchronous motor – Reducing cogging torque and eddy current loss –", Journal JSAEM, Vol.20, No.2, pp.410-415, 2012
- (2) H. Weh *et al.*: "New Permanent Magnet Excited Synchronous Machine with High Efficiency at Low Speeds", in Proc. IEEE Elect. Mach. Conf., 1988
- (3) 山元雄太 他: 「船舶の電気推進を想定した横方向磁束型永久磁石モータの簡易高トルク設計」, 電学研資, RM-12-134, 2012
- (4) Y. Yamamoto *et al.*: "Evaluation of Direct-drive Disk-type Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Ship Propulsion through Fundamental Tests", IEEE Elect. Ship Tech. Symp., 2013, to be presented.
- (5) 森本茂雄 他: 「PM モータの *dq* 等価回路定数の測定法」, 電学論.D, Vol.113, No.11, pp.1330-1331, 1993
- (6) Y. Yamamoto *et al.*: "Speed-feedback Direct-drive Control of a Low-speed Transverse Flux-type Motor with Large Number of Poles for Ship Propulsion", PIERS 2013, 2013, to be presented.