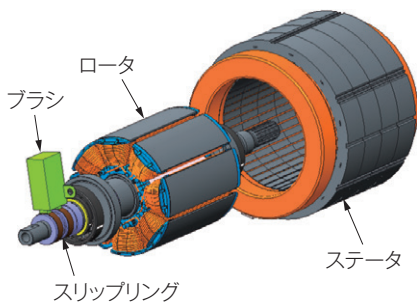


電動車駆動用巻線界磁形同期電動機

桜井茂夫 Shigeo Sakurai
諏訪園健 Takeshi Suwazono

キーワード 巻線界磁形同期電動機, 効率

概要



巻線界磁形同期電動機

電動車両用駆動モータは、走行時に使用頻度の高い低トルク領域での効率向上が求められる。現在、駆動モータとして主流の埋込磁石同期電動機（IPMSM）に対し、巻線界磁形同期電動機（EESM）は、ロータに永久磁石の替わりとして巻線を配置し、電流を流すことでロータの磁束量を調整できることから、低トルク領域での効率向上、定出力範囲の拡大が期待できる。さらに、永久磁石を使用しないためレアアースの供給不安に懸念がない。

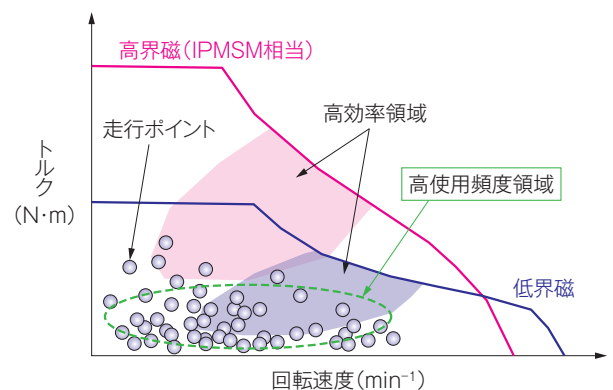
当社は100kWクラスのIPMSMに対し、EESMの優位性を確認するため、電磁界解析で性能を比較した。最大トルク性能と効率を比較した結果、数%のトルク密度が低下したが、中高速の低トルク領域で効率向上を確認した。

1 まえがき

電気自動車（EV）及びハイブリッド車（HEV）の駆動モータでは、低速大トルクと広い定出力範囲に対応しつつ、高使用頻度領域である低トルク領域における効率向上が求められる。現在駆動モータとして主流の埋込磁石同期電動機（IPMSM）は、高効率・高出力を得られるが、第1図の可変界磁機能概念図に示すように、中速中トルク領域に最大効率点が存在するため、最大効率点と高使用頻度領域が異なり、効率の良い運転ができないことが課題の一つである。この課題の解決には、界磁磁束を運転領域に応じて最適に切り替える可変界磁モータが有効である。その候補の一つとして、巻線界磁形同期電動機（EESM）が考えられる。このモータは界磁源として永久磁石の代わりに界磁巻線を用いたロータ構造を持ち、界磁巻線に外部回路から直流電流を

通電することで界磁磁束を調整できる。

近年、EESMのトルク密度や効率向上を目的と



第1図 可変界磁機能概念図

走行中の高使用頻度領域に対して、IPMSMの高効率領域が乖離している。IPMSM相当の高界磁では高いトルク・出力が得られるが、高回転まで運転できない。一方、低界磁では同じ入力条件でトルク・出力は低くなるが、高回転まで運転できる。さらに、鉄損が下がるため低トルク領域の効率が向上する。界磁磁束を調整することで、動力性能と効率を両立した運転ができる。

して研究が行われ、EV用駆動モータとして搭載された事例がある⁽¹⁾。本稿では、100kWクラスのIPMSMに対し、ロータのみ巻線界磁式で設計したEESMの特性を電磁界解析で計算し、両者の性能を比較した結果を紹介する⁽²⁾。

2 特徴

EESMは、IPMSMに対して以下の優位性を持つ。

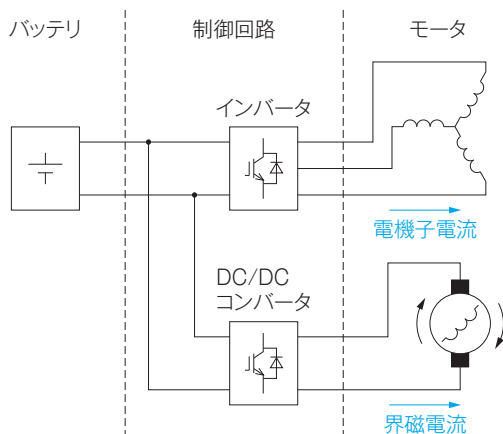
- (1) 可変界磁機能で中高速低トルク領域の効率が向上する。
- (2) 可変界磁機能で定出力範囲を広げることができる。
- (3) 永久磁石材料の供給不安の懸念がない。

一方で、界磁巻線の銅損によって低速高トルクほど効率が悪化することや、鉄心形状の制限によってリラクタンストルクが低く、体積当たりの最大トルクが低下するなどの課題がある。

3 仕様

3.1 駆動システム

第2図にEESMの駆動システムを示す。従来の三相インバータによるステータ電機子電流の供給に加え、DC/DCコンバータで調整した直流電流をロータに巻いた界磁巻線へ通電させる。回転体への電流供給となるため、界磁電流の供給はブラシとス



第2図 EESMの駆動システム

制御回路を介してバッテリーの電力をステータとロータへ供給することで駆動する。

リップリングを介して行われる。このため、ブラシとスリップリングを搭載するスペース分、筐体体積が増加する可能性がある。

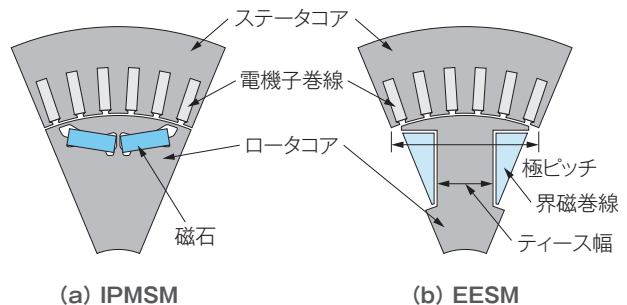
3.2 モータ仕様

第1表に解析したモータの仕様及び設計内容を、第3図に解析モデルを示す。基準となるIPMSMは、ロータ鉄心に磁石をV字配置で埋め込む設計とした。EESMはステータ断面形状をIPMSMと同等とし、ロータのみを巻線界磁式に置き換えて設計した。EESMは突極比の減少によってトルク密度が低下するため、鉄心長を伸ばした。EESMの界磁巻線を冷却するには構造上、空冷又は油冷が考えられるが、空冷では大幅な体格の増加が予想されるため、

第1表 仕様及び設計内容

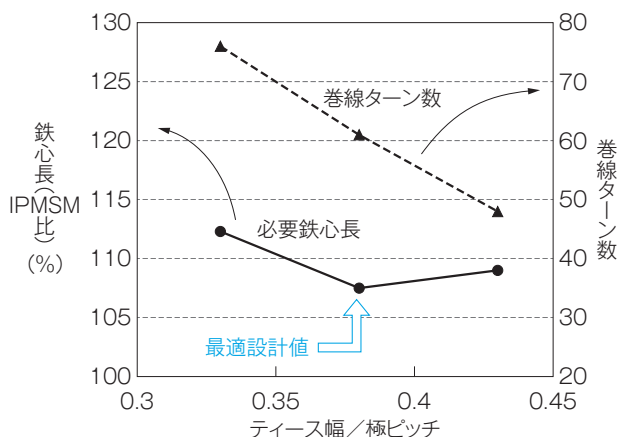
比較検討したモータの仕様及び設計内容を示す。

項目		IPMSM	EESM
仕様	最大トルク	200N・m	
	最大出力	100kW	
	最高回転速度	12,000min ⁻¹	
	最大電機子電流	340A _{rms}	
	最大直流電圧	350V	
	最大界磁電流	—	15A
設計	極数	8	
	スロット数	48	
	ステータコア外径	200mm	
	ロータ外径	128.6mm	
	鉄心長	100%	107.5%
	電磁鋼板特性	積層鋼板厚み	0.35mm
鉄損密度W10/50		0.91W	
ロータ	界磁源	磁石 (NdFeB)	界磁巻線
	冷却方式	空冷	油冷



第3図 解析モデル

電磁界解析に用いる1/8モデルを示す。



第4図 ティース幅の最適化結果

第3図に示すティース幅を変えた場合の巻線ターン数と必要鉄心長の変化を示す。必要鉄心長が最小となるティース幅を最適値とする。

油冷で設計している。

今回、第3図(b)に示すティース幅の最適化を実施し、第4図にその結果を示す。ティース幅を広げることでロータ磁路の磁気抵抗が下がる一方、スロット面積が狭くなるため巻線ターン数が減少する。最適化の結果、鉄心長の増加を7.5%に抑えることができた。

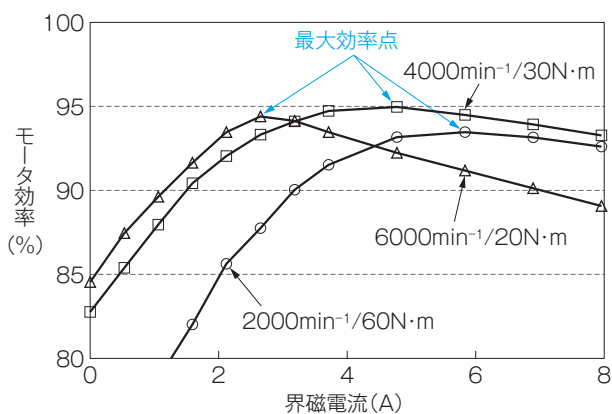
4 解析結果

4.1 電流制御

従来のIPMSMと同様に、電機子電流位相を最大トルク付近では最大トルク制御、そのほかの使用領域では最大効率制御、それらの制御で電圧が許容値を超えてしまう場合、弱め界磁制御によって決定する。EESMでは、電機子電流のほかに界磁電流の最適制御も実施する。第5図に界磁電流の最適化を示す。低トルク領域の幾つかの運転ポイントで、界磁電流を変化させた場合のモータ効率の変化を示している。界磁電流によって効率最大となる運転ポイントが存在するため、電機子電流と界磁電流を最適に制御する必要がある。

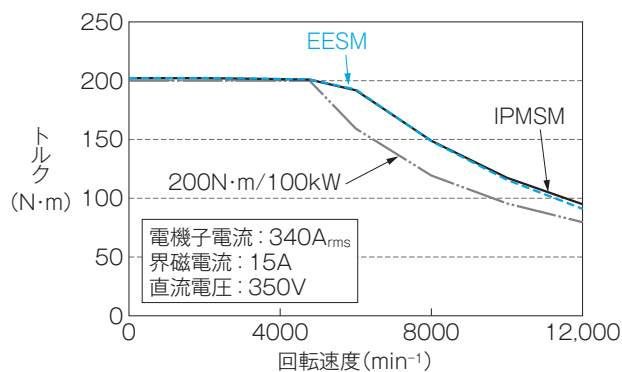
4.2 最大出力性能

第6図に電機子電流・界磁電流・直流電圧を制限した場合の最大トルクカーブを示す。IPMSMと



第5図 界磁電流の最適化

界磁電流に対するモータ効率の変化を示す。最大効率となる界磁電流を選定する。



第6図 最大トルクカーブ

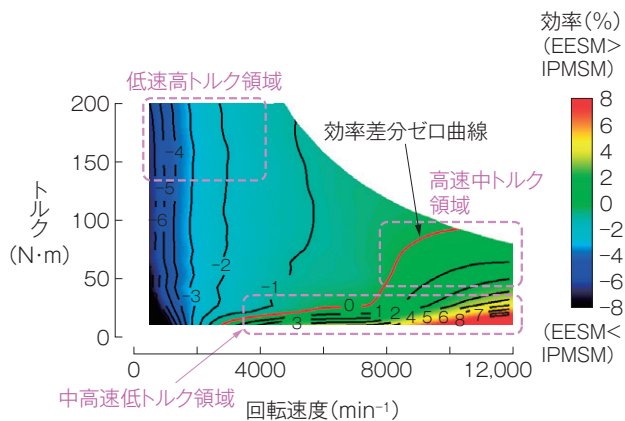
電機子電流・界磁電流・直流電圧を制限した場合に出力できるトルクカーブを示す。仕様の出力性能を満足している。

EESMは、仕様の最大トルク・出力を満足していることが確認できる。

4.3 効率

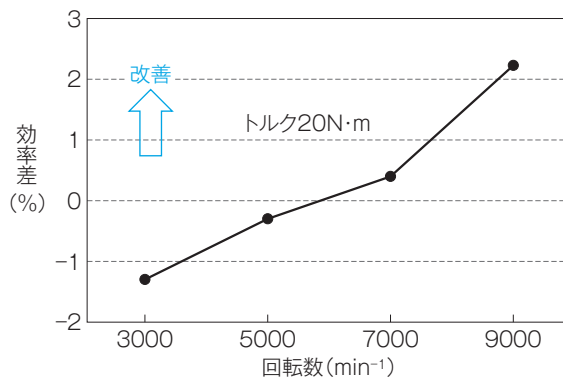
第7図に効率差分マップを示す。モータと制御回路を含むユニット全体の効率をIPMSMとEESMでそれぞれ算出し、IPMSMに対するEESMの変化分としている。可変界磁機能で鉄損が低減された影響で、中高速低トルク領域の効率が向上している。一方、低速高トルクほど界磁巻線銅損増加の影響が大きいいため、効率が悪化している。また、高速中トルク領域でも弱め界磁電流の低減や高調波磁束の低減によって効率が改善している。

第8図に走行中の使用頻度が高いとされる10%トルク(20N·m)におけるEESMのIPMSMに対す



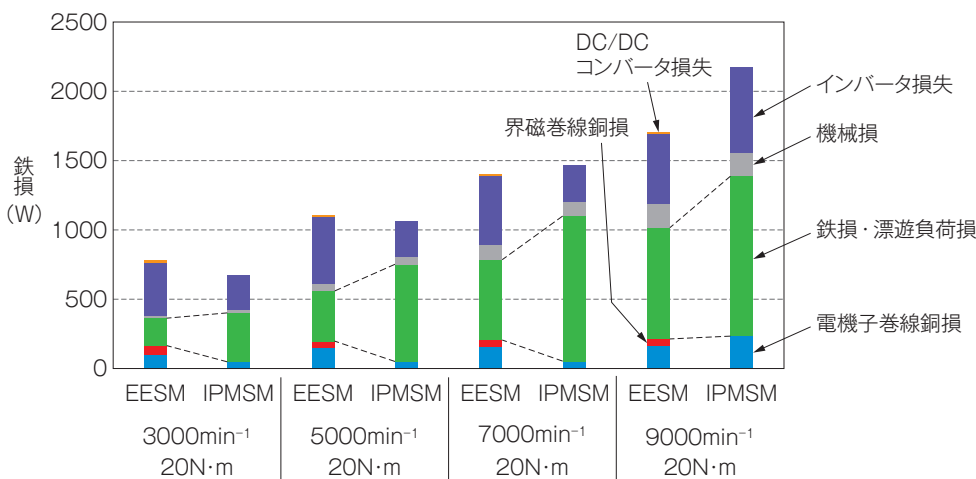
第7図 効率差分マップ

IPMSMに対するEESMの効率差を示す。効率差分ゼロ曲線より低トルク側で、EESMがIPMSMを上回っている。



第8図 低トルク領域の効率差

10%トルク (20N·m) でのIPMSMに対するEESMの効率差を示す。高速領域ほど効率が改善されている。



第9図 低トルク領域の損失内訳

10%トルク (20N·m) でのEESMとIPMSMの損失内訳を示す。EESMでは鉄損・漂遊負荷損が低減されている。

る効率差を、第9図にEESMとIPMSMそれぞれの損失内訳を示す。EESMでは銅損とインバータ損失の比率が相対的に高くなっているが、鉄損・漂遊負荷損の比率が低減し、鉄損が支配的な高速領域で効率が改善されている。

5 むすび

EESMとIPMSMの性能を比較し、以下の結果を得た。

(1) EESMの効率はIPMSMに比べて低速高トルクほど悪化するが、中高速低トルク領域で向上することから、この領域で頻繁に使用される用途やモータ

の連れ回り走行の多い用途に適している。

(2) リラクタンストルクの減少や磁気飽和の影響で、同じ出力仕様を満足するためのコア体積はIPMSMに比べて7.5%増加する。さらに、界磁電流を供給するブラシとスリップリングのスペースを含めると、筐体体積としては大形化するため、搭載スペースに余裕が必要となる。

以上のように、EESMは大形化や一部領域での効率悪化が課題となるが、使用用途やコスト安定性の面からIPMSMに対する優位性を得られる可能性があり、電動車両用駆動モータの候補の一つとして考えることができる。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) <https://evobsession.com/renault-zoe-gets-15-boost-in-range-from-new-motor/>
- (2) S. Sakurai, T. Suwazono, T. Mizuno, K. Nagata, T. Ashikaga : "Performance Comparison Study of Wound Field Synchronous Motor and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor," EVS 31 & EVTeC 2018, No.20189411

《執筆者紹介》



桜井 茂夫
Shigeo Sakurai
EV事業部開発部
回転機的设计開発に従事



諏訪 園 健
Takeshi Suwazono
EV事業部開発部
回転機的设计開発に従事
