

かご形誘導電動機と自励式巻線界磁形同期電動機の駆動特性比較

青山 真大*, 丸山 大輔, 野口 季彦(静岡大学)

Comparison on Drive Performance of Cage-Squirrel Type Induction Machine and Self-Excited Wound-Field Synchronous Motor

Masahiro Aoyama*, Daisuke Maruyama, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. まえがき

電磁誘導原理を利用するモータとして、非同期駆動する誘導電動機 (IM) と、非同期回転磁界から誘導起電力を得てダイオード整流を介して同期駆動する自励式巻線界磁形同期電動機 (SEWFSM) がある⁽¹⁾。本稿では、同コアサイズ (ステータ外径φ125 mm, 積厚 L80 mm) の分布巻ステータのかご形 IM と SEWFSM の駆動特性を電磁界解析により比較を行い、IM に対する SEWFSM の課題と優位点について考察したので報告する。

2. 検証用モータ

Fig. 1 に SEWFSM と IM の径方向断面図を示し、Table 1 にモータ主要諸元を示す。IM は 4 極 24 スロット ($q = 2$) でスロットコンビネーションはロータ : ステータ = 27:24 である。最大電機子起磁力は、 $389 \text{ A}_{\text{rms}}\text{T}$ (電流密度 $7.0 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$, 空冷式) である。IM の二次導体はアルミニウムであり、電気伝導率は $2.655 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ で設定している。

3. 電磁界解析による駆動特性比較

<3・1>解析モデル 両モータは制御開発を目的に 1kW 以下で設計しており、共に最高回転速度を 2,000 r/min で構造設計している。ここで +q 軸を電流位相基準としており、-d 軸方向を進角側と定義している。直流バス電圧は $100 \text{ V}_{\text{dc}}$ で最大電圧利用率を 96% 駆動とし、二次元電磁界解析 (JMAG-Designer v.16.1) にて駆動特性のシミュレーションを行う。

<3・2>可変速特性 Fig. 2(a)に両モータの可変速特性を示す。同図より、500 r/min 以下の回転速度においては IM のトルク τ が SEWFSM よりも大きい。SEWFSM は Fig. 2(b)に示す第 2 次空間高調波 (基本波同期座標上における第 3 次時間高調波) によってロータ巻線に起電力を誘導させているため、低回転時は十分な起電力を得ることができず、整流後にロータ巻線抵抗でジュール損として消費されてしまう。その結果、十分な界磁電流を自励することができずトルクが低下する。一方、IM の場合は非同期駆動のため、すべり s によって低回転時も十分な起電力を得ることができる。

Fig. 3 に両モータのトルク特性を示し、Fig. 4 に SEWFSM のロータ電流を示す。両図より、SEWFSM はロータ界磁量がファラデーの法則に基づくため、一定の電機子起磁力下においても回転速度によって界磁電流がパッシブに変化し、トルク特性が増減することがわかる。一方、Fig. 2 から SEWFSM は 750 r/min から基底回転速度 1,000 r/min に回転速度が増加するときにトルクの増加量が減少する。これはロータティース

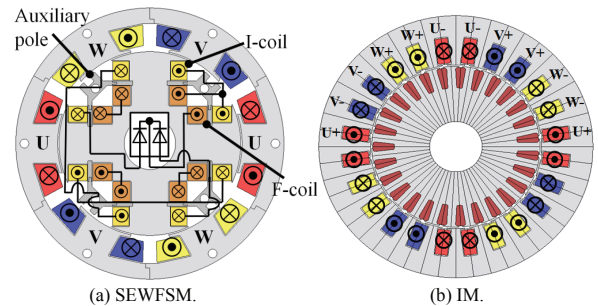
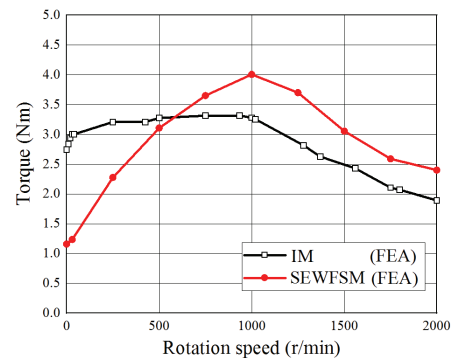


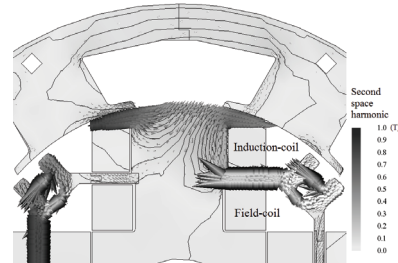
Fig. 1. Cross section of SEWFSM and cage-squirrel type IM.

Table 1 Main Specifications of SEWFSM and IM

	SEWFSM	IM
Core size	φ125 * L80	
Core material	30DH (Nippon Steel & Sumitomo Metal)	
Air-gap length	0.65 mm	
Rotor inner diameter	φ24 mm	
Secondary conductor	φ0.75-AIW wire I-coil: 120 turn F-coil: 120 turn	Aluminum-conductor
Stator winding	Concentrated	Distributed



(a) Speed-vs.-torque characteristics under bus-voltage 100-V_{dc} .



(b) Second-order space harmonic distribution of SEWFSM

Fig. 2. Adjustable speed drive characteristics under 389 AT and MTPA control and second-order space harmonic distribution. (Bus-voltage 100-V_{dc} with maximum voltage utilization rate: 96%)

部の磁気飽和による影響に加えて、SEWFSM の界磁エネルギー源になる第 2 次空間高調波と誘導コイル (I-coil) で発生す

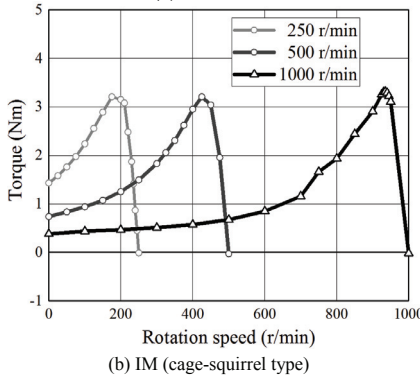
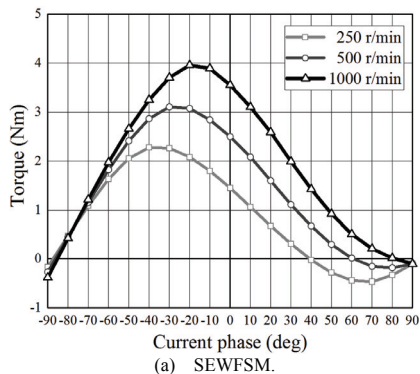


Fig. 3. Current phase or rotation speed-vs.-torque characteristics under 389 A_{rms}T.

る逆相の起電力が拮抗していることによる。定トルク制御時は Fig. 3 の MTPA 点で駆動しているが、基底回転速度以上の 1,500 r/min は弱め界磁制御領域のため、Fig. 5 に示すように電流位相を +30 deg としている。その結果、I-coil に鎖交する第 2 次空間高調波も変化し、Fig. 4 に示すように 1,500 r/min 時の界磁電流は 1,000 r/min のときよりも減少している。

一方、IM の場合は Fig. 3(b) の s - τ 特性において基底回転速度以下は同期回転速度を変化させながら、Fig. 6 に示すように最大トルクとなる s で駆動し、基底回転速度以上の領域では s を増加させて定電圧制御駆動をしている。Fig. 2(a) より、500 r/min を超えた回転速度では SEWFSM のほうが IM よりも高トルクとなる。ここで IM は原理的にすべりによって起電力を得て二次磁束を発生させ、電機子磁束を二次磁束で磁気遮蔽することで周方向電磁力（トルク）を発生させている。その結果、Fig. 7 および Fig. 8 において 1,500 r/min 時における磁束密度を比較すると IM は SEWFSM よりも低磁束密度になっており、結果、IM の場合の電機子鎖交磁束量が SEWFSM よりも減少し、トルクが低下する。一方、SEWFSM は空間高調波から得た起電力を整流して同期駆動且つ強め界磁駆動し、電機子起磁力や電流位相によって界磁量をパッシブに調整することができる。その結果、定電圧制御時に IM よりも磁束密度の低下を防ぐことができ、高トルク化を実現できる。Table II に両モータの各回転速度におけるロータ電流密度を示す。SEWFSM は $\phi 0.75$ の AIW 丸線を界磁コイル (F-coil) として 120 ターン巻いており、IM はスロット内の二次導体 (アルミバー) 断面積が 35.45 mm² である。同表より、基底回転速度以上の領域においては両モータは同等の電流密度で駆動していることがわかる。一方、IM はダイキャスト成形のため高い耐熱性を有するが、SEWFSM 絶縁処理した鉄心にコイルを巻き付けた後、ワニス含浸して絶縁性と機械強度を確保し

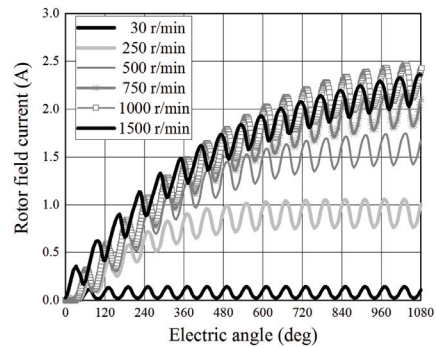


Fig. 4. Rotor currents of SEWFSM under 389 A_{rms}T and MTPA control.

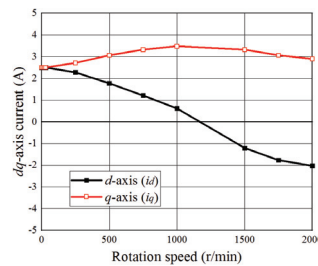


Fig. 5. Speed-vs.-dq-axis current characteristics of SEWFSM.

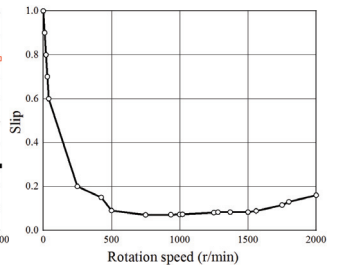


Fig. 6. Speed-vs.-slip characteristics of IM under 389 A_{rms}T and 100 V_{dc}.

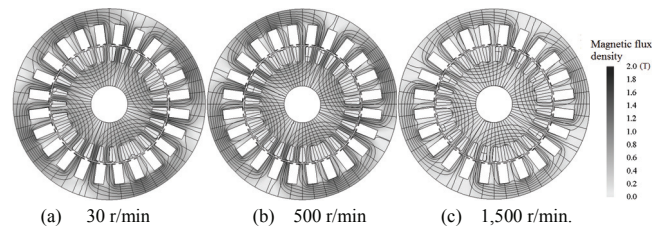


Fig. 7. Magnetic flux density of cage-squirrel type IM.

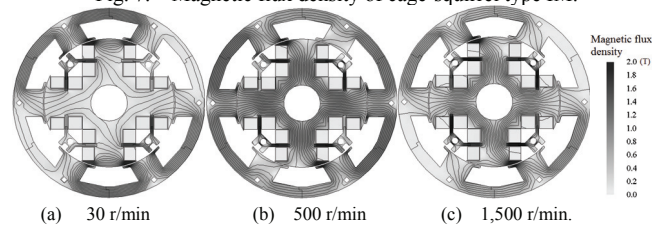


Fig. 8. Magnetic flux density of SEWFSM.

Table II. Rotor current density with respect to rotation speed.

Rotation speed (r/min)	SEWFSM	IM
30	0.5 A/mm ²	2.8 A/mm ²
250	1.8 A/mm ²	3.1 A/mm ²
500	3.6 A/mm ²	4.2 A/mm ²
750	4.5 A/mm ²	5.5 A/mm ²
1,000	5.6 A/mm ²	5.8 A/mm ²
1,500	5.1 A/mm ²	5.6 A/mm ²

ているため、IM よりも耐熱性が劣る。そのため、フェールセーフ機能の観点から、SEWFSM はロータ巻線温度を非接触で推定する技術が必須となる。

3. まとめ

本稿では空間高調波によって誘導起電力を得て自励する巻線界磁同期電動機と、すべりによって誘導起電力を得るかご形非同期電動機の駆動特性を電磁界解析により比較し、諸特性の違いを明らかにした。今後は試作機を用いて実機検証を行い、効率や損失特性についての比較も行う予定である。

文献

(1) 青山 他：電学論 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881, 2015.