

三相集中巻誘導電動機の基礎検討

青山 真大 (静岡大学/スズキ), 柳澤 弘章* (スズキ), 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study on Three-Phase Induction Motor with Concentrated Winding Stator

Masahiro Aoyama (Shizuoka University/SUZUKI Motor Corporation), Hiroaki Yanagisawa (SUZUKI Motor Corporation),
Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

近年, 誘導電動機における高効率化の手法としてロータティース先端に溝を設けることで高調波二次銅損の低減を図った取り組みのほか, 材料的なアプローチとして銀入り銅を使用することで二次銅損を低減する設計や SMC コアを用いて高周波駆動時の鉄損低減を狙った取り組みが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。集中巻ステータによる一次銅損低減の取り組み事例として, 多相化して高調波起磁力を低減する取り組みが報告されているが, 多相化に伴う電力変換器側の高コスト化が問題となる⁽³⁾。本稿では, 上記のような問題に鑑み, 従来のかご形ロータ (C-rotor) ではなく集中巻短絡結線されたセグメント巻線形ロータ (SW-rotor) を用いてステータスロットとロータスロットの比が 5:3 となる三相集中巻誘導電動機のトルク特性の検討を行ったので報告する。

2. スロットコンビネーションの検討

図 1 に集中巻ステータにソリッドロータを内包した場合の磁束密度分布とギャップ磁束密度の調波解析結果を示す。同図より静止座標における第 2 次空間高調波が約 50%以上重畳しており, ロータに鎖交する磁束も隣り合うステータティース間で短絡磁路を形成している。このことより, ロータ構造を従来のかご形ではなく集中巻短絡結線とすることで空間高調波による渦電流低減と誘導トルクの向上が可能であると考えた。図 2 に SW-rotor (銅バー導体を 1 T) を内包させ, ステータ 3 スロットあたりのロータスロット数を変えた場合のトルク比較結果 (滑り $s = 0.2$ 固定) を示す。同図よりスロットコンビネーションが 4:3 以上となるようなロータスロット数であれば三相集中巻誘導機として平均トルクを得ることができる。図 3 にスロットコンビネーションが 5:3 系列のときに C-rotor と SW-rotor (銅バー導体を 1 T) の両者に対し, 同じ励磁条件でトルクを比較した結果 (滑り $s = 0.2$ 固定) を示す。同図より, 従来のかご形ロータでは平均トルクは僅かであるが, ロータバーを集中巻短絡結線した SW-rotor (銅バー導体を 1 T) 構造にすることで有効な平均トルクを出力できることがわかる。

3. ロータ起磁力設計

図 4 に同じ励磁且つ滑り条件で SW-rotor のアンペアターンを変更したときのギャップ磁束密度を示す。同図より,

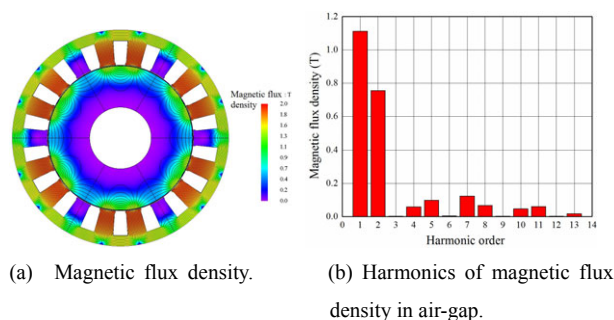


図 1 磁束密度分布とギャップ磁束密度の調波解析結果
Fig. 1. Magnetic flux density and harmonic analysis result of magnetic flux density in air-gap.

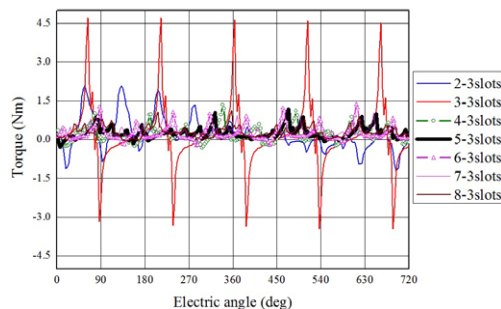


図 2 スロットコンビネーションに対するトルク
Fig. 2. Torque with respect to slot combination.

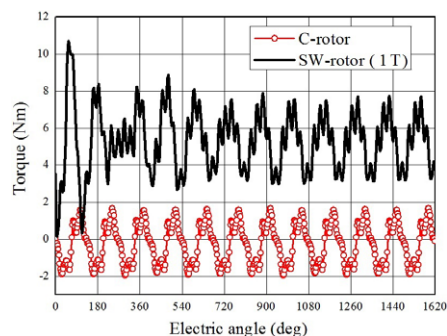


図 3 かご形と分割かご形ロータのトルク
Fig. 3. Torque waveforms of conventional squirrel-cage and segmented squirrel-cage rotors.

図 1 のソリッドロータを内包したときのギャップ磁束密度に対して SW-rotor (銅バー導体を 1 T) は短節巻になるため

著しく磁束密度が低下している。そこでロータ巻線を銅バ
ー導體から $\phi 0.8$ の丸線に変更し、ターン数を増やすことで
ロータ起磁力を向上させることとした。占積率の都合から
SW-rotor ($\phi 0.8$ 丸線を17 T)とした。図4よりターン数増加
によりロータ起磁力の向上を確認できる。

4. 電磁界解析による運転特性の確認

図5(a)に示すように12極ロータ30スロット、ステータ
18スロットの三相集中巻誘導機で検討する。スロットコン
ピネーションはロータティースの磁気飽和を考慮して5:3
系列とした。コアサイズは $\phi 123$ -L34であり、最大負荷時の
ステータ巻線起磁力は $848.5 \text{ A}_{\text{rms}}\text{T}$ (電機子巻線電流密度
 $28 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$)である。ロータコイルターン数は17 T/toothで
ある。図6(a)に1000 r/minにおける $848.5 \text{ A}_{\text{rms}}\text{T}$ で励磁した
ときの滑りトルク特性を示す。同図より、 $s=0.25$ のとき
に停動トルクとなることがわかる。このとき図5(b)に示す
ような磁束密度分布となっている。一方、図6(a)において s
 $=0.6$ のとき高調波同期トルクが発生し、図6(b)のように滑
り周波数成分に起因して発生する誘導トルクに加えてイン
ダクタンスの高調波成分と滑り周波数が同期することで高
調波同期トルクも活用可能となり、電流位相によってトル
クが変化する⁽⁴⁾。スロット高調波のみ考慮したロータとステ
ータの d 軸インダクタンス(L_{rd} , L_{sd})において両インダク
タンスの積は(1)となる。このとき、(2)を満たす関係が成り
立つときに高調波同期トルクが発生する。 $\omega_1=1$ とおいたと
き $\omega_2=\pm 0.4$ となり、すなわち $s=0.6$ と1.4のときに高調波
同期トルクが発生する。

$$L_{rd}L_{sd} = (L_{rd0} + L_{rda} \cos 5\omega_2 t)(L_{sd0} + L_{sda} \cos 3\omega_1 t) \quad (1)$$

$$\omega_1 = 3\omega_1 + 5\omega_2, \quad \omega_1 = 3\omega_1 - 5\omega_2 \quad (2)$$

5. まとめ

本稿では、集中巻短絡結線されたセグメント巻線形ロー
タを用いる三相集中巻誘導機を提案した。電磁界解析によ
り滑りトルク特性と高調波同期モード時の電流位相一
トルク特性を明らかにした。今後、磁気回路の改良により
トルク密度と効率向上の検討を行うとともに、ロータ巻線
電流密度が増加($32 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$)する傾向にあるため、ロータ
巻線の冷却構造についても検討を進める。

文 献

- (1) M. Kondo, M. Miyabe, R. Ebizuka, K. Hanaoka: "Design and Efficiency Evaluation of a High Efficiency Induction Motor for Railway Traction, *IEEJ Technical Meeting*", MD-13-26, RM-13-35 (2013)
- (2) T. Iwasaki, M. Inamori, M. Morimoto: "Performance of Induction Motor Made of SMC Core", *IEEJ Trans. IA*, Vol.134, No.9, pp.815-820 (2014)
- (3) 「多相集中巻かご形誘導機」公開特許公報(A), 特開2010-11674 (2008)
- (4) A. Ishizaki, S. Onodera, K. Saito, H. Miura: "Quantitative Study on Factors Affecting Asynchronous Torque due to Harmonics in Squirrel-cage Induction Motor", *IEEJ Trans. B*, Vol.106, No.6, pp.511-518 (1986)

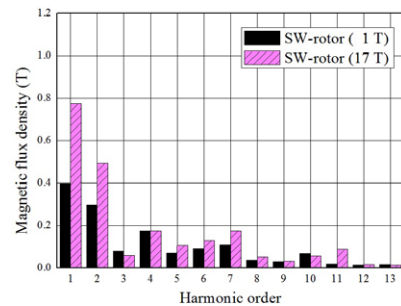


図4 ギャップ磁束密度の調波解析結果

Fig. 4. Harmonic analysis of magnetic flux density in air-gap.

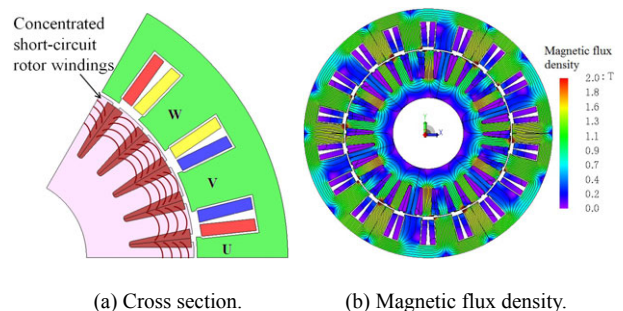
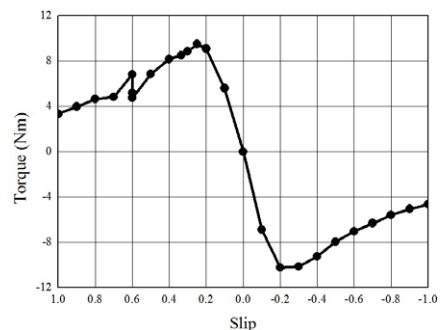
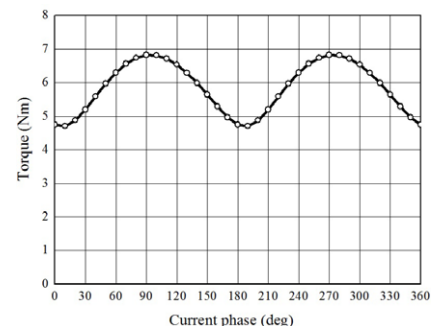


図5 提案モータと磁束密度分布

Fig. 5. Proposed motor and magnetic flux density.



(a) Slip-torque characteristics for 1000 r/min.



(b) Current phase-torque characteristics under harmonic synchronism ($s=0.6$).

図6 滑りトルク特性と高調波同期時の電流位相一トルク特性

Fig. 6. Slip-torque characteristics and current phase-torque characteristics under harmonic synchronism.