

空間高調波を二次励磁に活用した 集中巻ステータ構造のかご形誘導電動機の基礎検討

青山 真大*, 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study of Squirrel Cage Type Induction Machine Utilizing Space Harmonics for Secondary Excitation with Concentrated Winding Stator

Masahiro Aoyama *, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a novel squirrel cage type induction machine utilizing space harmonics for secondary excitation. The unique point of this proposed technique is able to utilize space harmonic for torque generation. Its space harmonic is inevitably generated by concentrated winding structure. The magnetic circuit topology of brushless secondary excitation technique with space harmonic and its effects on torque improvement is conducted by FE-analysis. Then, the driving performance are analytically revealed by comparing with a conventional squirrel cage type induction machine.

キーワード：かご形誘導電動機，二次励磁，集中巻ステータ，空間高調波，ブラシレス

Keywords : squirrel cage type induction machine, secondary excitation, concentrated winding stator, space harmonics, brushless

1. はじめに

近年，地球環境への負荷低減の産業界における取組みとして，電気エネルギーを機械エネルギーに変換するモータの高効率化が強く求められている。三相駆動する各種モータの一例として，永久磁石式同期電動機 (IPMSM) や巻線界磁形同期電動機 (WFSM)，誘導電動機 (IM) などが挙げられる。IPMSM は高トルク，高効率といった特長を有するが，一方でネオジム磁石を用いたタイプの場合は産出地の偏在化による資源調達リスクや価格変動リスクを有する。WFSM は一般的には摺動接点を用いてロータ巻線へ給電するため，堅牢性と保守性が低いといった問題を有する。IM の場合，構造がシンプルで原理的に摺動接点を必要としないため，堅牢性と保守性が高い。さらに原理的に非同期駆動による電磁誘導原理で駆動するため，ネオジム磁石を必要とせず資源供給面とコスト面における安定性が高い。しかし，IM は IPMSM と比較するとモータ効率とトルク密度が低く，更なる性能向上が期待されている。

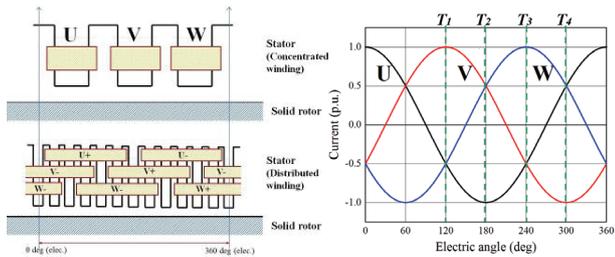
IM の高効率化の取組みとして，回転子方面付近に鎖交するスロット高調波起因の高調波二次銅損を低減するために回転子スロット形状を最適化した取組みや，PWM インバータで駆動される IM のキャリア損 (キャリア高調波によって固定子，回転子鉄心および導体で発生する損失) の詳細分析の研究が報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。一方，経済産業省が 2013

年に取りまとめた資料では損失構成の一例として，一次銅損が約 40 % と全損失に占める割合が大き⁽⁶⁾。一次銅損を低減する目的で集中巻ステータの IM の研究が報告されている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。集中巻 IM とすることで特に電動車用途のように車載時のスペース制約が大き⁽¹⁰⁾。その結果，空間高調波によってもロータ側で誘導起電力が発生し，高調波二次銅損が生じる。すなわち，基本波回転磁界に対するすべりだけではなく，空間高調波に対するすべりも考慮した磁気回路設計を行う必要がある。

上記の問題に鑑みて，本稿では空間高調波もトルク発生に利用できるブラシレス二次励磁技術の提案をし，電磁解析によるその効果を検証する。従来技術は空間高調波に起因して発生する誘導起電力を低減する検討だが，本稿ではかご形ロータ構造の工夫をすることでトルク発生に積極的に活用しているところが特長である。

2. 磁気回路設計コンセプト

〈2・1〉集中巻の電機子起磁力分布 Fig. 1 に簡易化したステータ構造およびステータ電流を示す。Fig. 2 に Fig. 1(b)の各時間 ($T_1 \sim T_4$)における簡易化したギャップ起磁力波形を示す。Fig. 3 に Fig. 2 の波形を基本波と第 2 次空間高調



(a) Concentrated winding and distributed winding structure. (b) Three-phase armature currents. Fig. 1. Simplified armature winding structure and each time of armature current waveform.

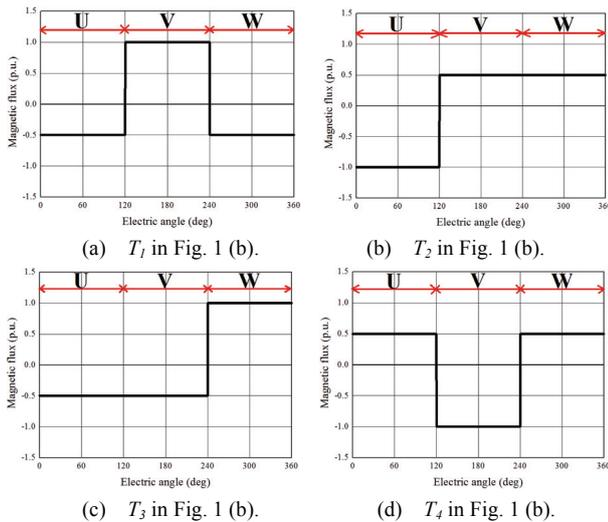


Fig. 2. Simplified magnetomotive force distribution without slot-opening harmonic in air-gap with respect to each time of current waveform.

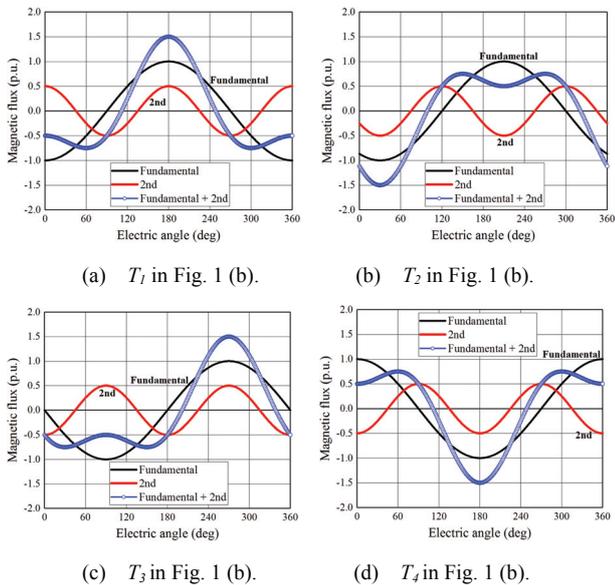


Fig. 3. Magnetomotive force distribution of Fig. 2 approximated by fundamental waveform and second-order space harmonic.

波のみで近似したギャップ起磁力波形を示す。Fig. 3 から時間が進むに従い、第 2 次空間波が基本波に対して逆方向に進行していることが確認できる。つまり、誘導ロータを内包した場合は基本波回転磁界に対するすべり s_1 と第 2 次空間高調波に対するすべり s_2 を考慮する必要がある。基本波

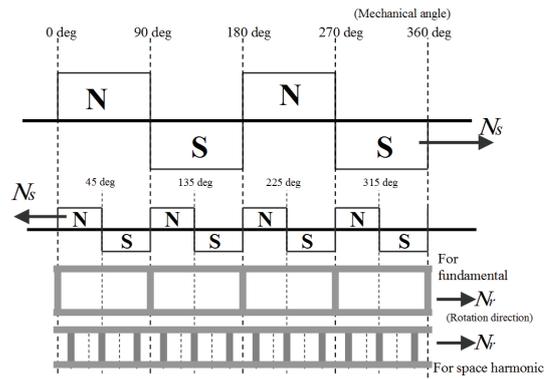


Fig. 4. Armature magnetomotive force and squirrel cage rotor design concept.

回転磁界の回転速度を N_s 、第 2 次空間高調波を $2N_s$ 、ロータの回転速度を N_r とおくと s_1 および s_2 は以下の通りとなる。

$$s_1 = \frac{N_s - N_r}{N_s}, \quad s_2 = \frac{2N_s - (-N_r)}{2N_s} = \frac{2N_s + N_r}{N_s} \quad (1)$$

〈2・2〉 かご形ロータ構造の工夫 ロータが同期回転 ($N_r = N_s$) 時は(1)より、 $s_1 = 0, s_2 = 3.0$ となる。その結果、一般的なかご形構造でロータ磁気回路設計をした場合、 s_2 に起因して基本波回転磁界に同期時 ($s_1 = 0$) も 3 倍調波の誘導起電力が生じてしまう。

上記の問題を解決するために Fig. 4 に示すように基本波回転磁界にカップリングするロータバー Bar1 (Fig. 4 の For fundamental) と、第 2 次空間高調波にカップリングするロータバー Bar2 (Fig. 4 の For space harmonic) の 2 種類を有する構造とし、それぞれエンドリングで短絡結線させて 2 種類のロータバーは電的に独立した状態で構成する。ここで、4 極構造の場合を例として図示している。Bar1 は基本波のみに磁気結合させるため、1 極分のピッチでロータバーを配置し、計 4 本のロータバーをエンドリングで短絡させている。Bar2 に対して第 2 次空間高調波が鎖交しても第 2 次空間高調波の 1 極対分のピッチとなっているため、第 2 次空間高調波による磁気干渉は無視できる。一方、静止座標系における第 2 次空間高調波は基本波に対して逆方向に回転する磁界のため、基本波同期回転座標上で観測すると第 3 次時間高調波となる。よって、Bar2 は計 12 本のロータバーをエンドリングで短絡させる。ここで、Bar2 はロータバーピッチの都合上、磁気結合係数は低いが基本波回転磁界が鎖交したときに誘導起電力が生じてしまう。さらに基本波振幅に対して第 2 次空間高調波は約 1/2 の振幅のため、Bar2 の二次抵抗 R_{2-2} を調整することで s_2 に対するすべり s_2 -トルク τ_2 特性を調整する必要がある。ここで τ_2 は第 2 次空間高調波によって生じるトルクである。Fig. 5 に(2)の一般的な IM のトルク式を用いて s_1 に対する s_1 - τ_1 特性、 s_2 に対する s_2 - τ_2 特性を示す。傾向を把握するため、一般的なモータパラメータを用いて計算した。なお、Bar2 は基本波回転磁界によって誘導起電力が発生しないという近似のもとで机上計算している。同図より、Bar2 の二次抵抗 R_{2-2} を高めに設計したほうが最大トルク ($\tau_1 + \tau_2$) を向上できること

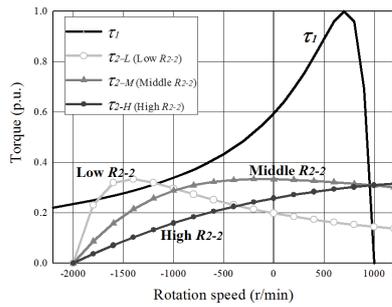
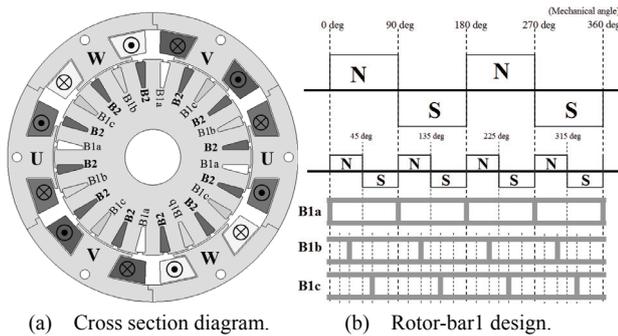
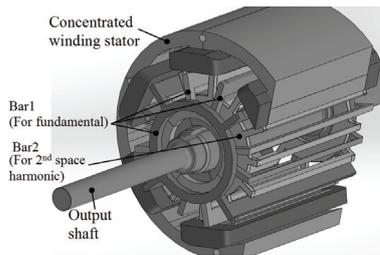


Fig. 5. Slip-vs.-Torque characteristics due to fundamental rotating magnetic field and Slip-vs.-Torque characteristics due to 2nd-order space harmonic. (Desk calculation with general motor parameter)



(a) Cross section diagram.

(b) Rotor-bar1 design.



(c) Rotor bar design.

Fig. 6. Downsized prototype for principle verification.

がわかる。

3. 電磁界解析による原理検証

〈3-1〉 原理検証機 Fig. 6 に原理検証機の径方向断面図と構造設計 (案) を示し、主要なモータ諸元を Table I に示す。同図で表記スペースの都合上、Bar1 を B1、Bar2 を B2 と記載している。空間高調波による二次励磁原理の実機検証を見据えて 1kW 程度の小型化したモデルで磁気回路設計を行っている。Fig. 6 に示すように基本波にカップリングさせる Bar1 は電気角 120 deg ずらして B1a、B1b、B1c を配置して三相構成にしている。それぞれは互いに電氣的に独立した構成としている。

〈3-2〉 性能予測 Fig. 7 に基本波回転磁界が 1000 r/min のときのすべり s_f -トルク ($\tau_1 + \tau_2$) 特性を示す。同図の Without Bar2 は Bar2 をエンドリングで短絡結線せずに開放にしたときの結果である。同図より、Bar2 がない場合、すなわち第 2 次空間高調波によって誘導起電力を得ておらず、基本波回転磁界のみでトルクを発生させると大幅にトルクが低下する。Fig. 8 に Bar1 のエンドリングを開放にした場合 (Without B1) と Bar2 のエンドリングを開放にした場合 (Without B2)

Number of poles and slots of stator	4 pole, 6 slots
Stator diameter and stack length	$\phi 125 \times L80$
Number of rotor slots	24 slots
Armature winding resistance	1.0 Ω
Bar1 end-ring resistance	$1.07 \times 10^{-4} \Omega$
Bar2 end-ring resistance	$0.98 \times 10^{-2} \Omega$
Number of armature coil-turn	110

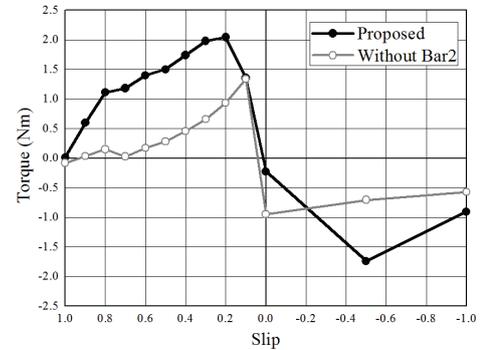


Fig. 7. Slip-vs.-torque characteristics. (Fundamental rotating magnetic field: 1000 r/min)

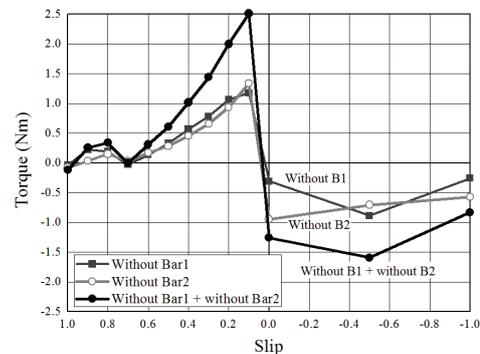
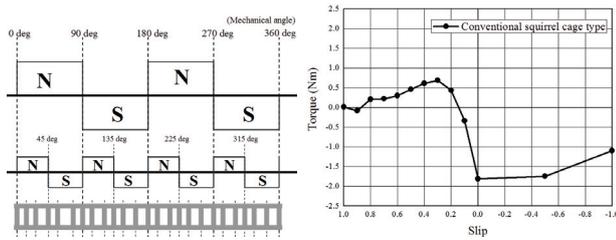


Fig. 8. Slip-vs.-torque characteristics without B1 or B2. (Fundamental rotating magnetic field: 1000 r/min)

および 2 ケースの和 (Without B1 + without B2) を示す。同図より、"Without B1" により第 2 次空間高調波によりトルク τ_2 、"Without B2" により基本波によりトルク τ_1 を得ていることがわかる。しかし、Fig. 7 の"Proposed" の結果と Fig. 8 の"Without B1 + without B2" の結果を比較するとトルク特性が異なる。これは B1 に流れる誘導電流によって生じる二次磁束と B2 に流れる誘導電流によって生じる二次磁束の磁路が Fig. 6 に示すように重なっているため、相互作用によってインダクタンスが変化するためであると考えられる。

Fig. 9 に従来のかご形ロータバー構造 (Fig. 6(a)のロータバーをエンドリングで全短絡) で Fig. 7 と同様の駆動条件ですべり s_f -トルク特性を解析した結果を示す。エンドリングの抵抗は $1.07 \times 10^{-4} \Omega$ である。Fig. 10 にロータバーの誘導電流 (一例として $s_f = 0.2$) を示す。Fig. 9 と Fig. 10 より、第 2 次空間高調波によって高周波の誘導起電力が生じることでロータ高調波電流が発生し、結果としてトルクが低下する。一方、提案モータ (Proposed) の場合、Fig. 11 に示すようにロータ電流に重畳する高調波成分を大幅に低減できていることを確認できる。Without B2 と Proposed を比較すると Bar2 があることでロータ高調波電流が低減している。



(a) Benchmark. (b) Slip-vs.-torque characteristics of benchmark.
 Fig. 9. Slip-vs.-torque characteristics at fundamental rotating magnetic field: 1000 r/min.

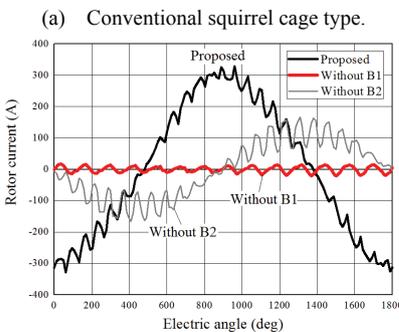
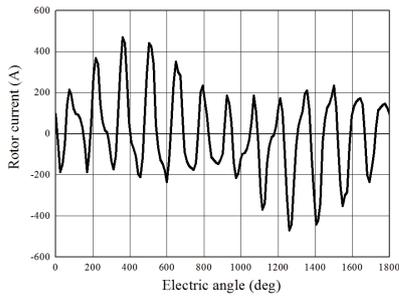


Fig. 10. Rotor current in rotor-bar conductor under slip $s_1 = 0.2$.

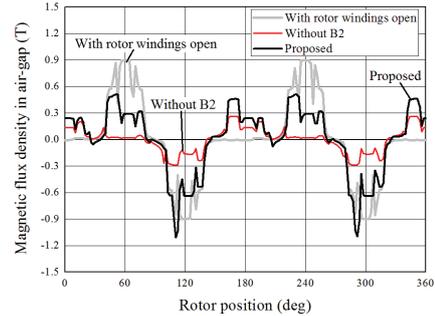
これは Bar2 で第 2 次空間高調波から誘導起電力を得て二次磁束が発生し、それがインダクタンスの変化により Bar1 に影響を及ぼしていると考えられる。これは、Fig. 12 に示すようにギャップ磁束密度で評価したとき Bar2 によってギャップ磁束波形が大きく変化していることから確認できるため、今後更なる要因分析を行う必要がある。Fig. 13 に Bar1 と磁気結合する基本波磁束と、Bar2 の起磁力源の第 3 次時間調波（ロータ座標上で観測）を示す。ここまでの結果から、提案モータは Bar2 で第 3 次時間高調波によってブラシレス二次励磁し、トルク発生に活用できていると言える。

4. まとめ

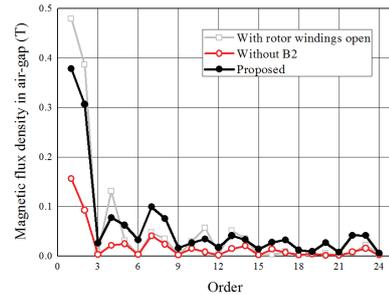
本稿では、空間高調波もトルク発生に利用できるブラシレス二次励磁技術の提案をし、電磁解析によるその効果を検証した。その結果、かご形ロータ構造の工夫をすることでトルク発生に積極的に活用できることを明らかにした。今後は実機にて駆動特性を実証していく予定である。

文 献

(1) 近藤稔・宮部実・海老塚龍次・花岡幸司：「鉄道車両駆動用高効率誘導電動機的设计と効率評価」, 電学論 D, Vol. 134, No. 4, pp. 468-474

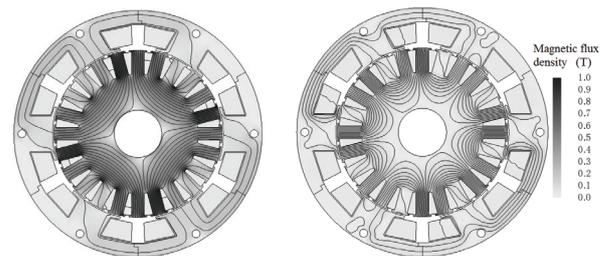


(a) Magnetic flux density.



(b) Harmonic contents.

Fig. 11. Magnetic flux density in air-gap and its harmonic contents under slip $s_1 = 0.2$.



(a) Fundamental magnetic flux. (c) Third-order time harmonic.
 Fig. 12. The contour of magnetic flux density and its flux lines.

(2014).
 (2) 山崎克己・福島範晃：「インバータ駆動誘導電動機のキャリア損一実験及び電磁界解析による分離結果の比較」, 電学論 D, Vol.129, No. 11, pp. 1068-1074 (2009).
 (3) 國廣直希・西濱和雄・飯塚元信・杉本健一・澤島公則：「インバータ駆動時における 1MW 級誘導電動機の損失評価」, 電学論 D, Vol. 134, No. 8, pp. 784-791 (2014).
 (4) 山崎克己・鈴木章活・大戸基道・高倉照幸：「電磁界解析による誘導電動機の浮遊負荷損及び高調波トルクを考慮した等価回路の構築」, 電学論 D, Vol. 130, No. 8, pp. 1030-1038 (2010).
 (5) 米谷晴之：「三次元解析による誘導電動機のスキューの効果に関する検討」, 電学論 D, Vol. 122, No. 12, pp. 1135-1141, (2002).
 (6) 「総合資源エネルギー調査会 省エネルギー基準部会 三相誘導電動機判断基準小委員会 最終取りまとめ」, 経済産業省資料参資 1, p.4 (2013)
 (7) 渡邊徳宏・和田安理・中村雅憲・廣塚功：「集中巻三相かご形誘導電動機の特性に及ぼす相間磁極の影響に関する一考察」, H30 年電気学会全国大会, No.5-053, p. 89 (2018).
 (8) H. A. Toliyat, T. A. Lipo, and J. C. White: "Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 4, pp.684-692 (1991)
 (9) O. Moros, J. Richnow, and D. Gerling: "New Cost Effective Concentrated Winding Topology for Induction Machines", *ANSYS Conference & 32nd CAD/FEM User's Meeting 2014*
 (10) 青山真大・野口季彦：「空間高調波を利用した補極付ラジアルギャップ磁石フリーモータの実機検証」, 電学論 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881 (2015).