

2 種類の回転磁界に着目した ブラシレス二次励磁形集中巻誘導ジェネレータ

青山 真大* (スズキ) 野口 季彦 (静岡大学)

Brushless Doubly-Fed Induction Generator
Focusing on Two-Type Rotating Magnetic Field with Concentrated Winding Stator
Masahiro Aoyama* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper presents a induction generator which can drive on regenerating torque even if its slip is positive. The application of proposed generator is newly range-extender hybrid electric vehicle system with integrated traction motor and generator for automotive application. The unique point of this technique is to utilize the second-order space harmonic which rotates in reverse direction against the fundamental rotating magnetic field. The basic drive performance is revealed by FE-analysis.

キーワード：集中巻，誘導機，空間高調波，スロットコンビネーション，巻線ピッチ，回生トルク

(Keyword: concentrated winding, induction machine, space harmonics, slot combination, winding pitch, regenerating torque)

1. はじめに

近年，世界的な環境規制の強化に伴い輸送機器分野におけるゼロエミッション社会に向けた動向として電動化が各国の政治戦略レベルで進められている。燃費向上ため，スタータージェネレータ (ISG) によるマイルドハイブリッド (Mild-HEV) システムからパワースプリット式 HEV システム (PS-HEV) など様々な技術ポートフォリオが検討されている⁽¹⁾。さらに近年，将来的な純電気自動車への展開を見据えてレンジエクステンダーEV の開発が進められており，文献(2), (3)に示す事例の通り，既に量産され市場に投入されている⁽²⁾⁻⁽⁷⁾。レンジエクステンダーユニットを用いることで電気自動車 (EV) の航続距離に対する不安を解消することができ，EV 専用のインフラ整備が不十分な現時点においては有望な手法である。一般的なレンジエクステンダーEV システムは Fig. 1 に示すようにエンジン軸に接続されたジェネレータと車両駆動軸に接続されたトラクションモータがあり，両電動機はそれぞれ 1 対のインバータが直流バス電圧を介してシステム構成されている。EV モードで駆動する場合はエンジン (ICE) を停止させ，バッテリーから供給される電気エネルギーのみで車両駆動軸を駆動させる。一方，バッテリーの SOC 状態や車両運転条件によって ICE を駆動させ発電制御を行う。レンジエクステンダーモード (RE モード) で発電された電気エネルギーは同図に示すようなエネルギーフローで車両駆動軸に動力として伝達される。必

要な給電能力から ICE の排気量決め，車載するバッテリー容量や，車両動力性能から決まるモータ出力等のバランス設計を行うことでシステム最適化を図ることができるが一方で，同図に示すように RE モード時のエネルギーフローはエネルギー変換回数が多いため，エネルギー伝達効率が悪いという問題点がある。さらにコンポーネント数が多いため，車載性やコスト面における課題が大きい。

上記の技術課題に対して近年，フリーピストン発電システム (FPEG) の検討などコンポーネントを一体化させる思想に基づき，発電システムの小型，高効率化の検討がされている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。ピストンに取り付けられた永久磁石がシリンダー側に取り付けられたコイルの中をピストンと共に往復運動することで発電を行っており，ピストンがクランクシャフトと繋がっておらず，軽量で高効率なシステム構成となっている。一方でこのシステムの場合においても発電された電気エネルギーを駆動軸に動力として伝達するためには

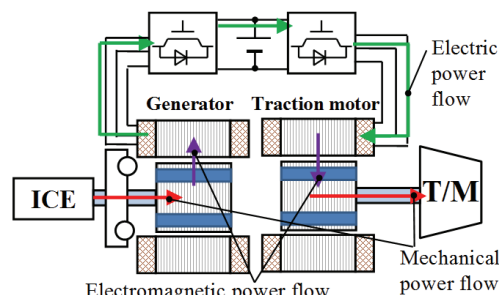
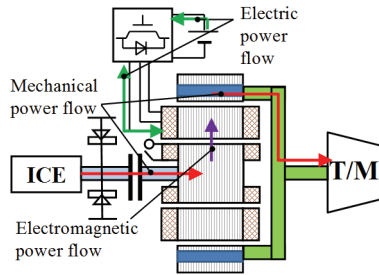
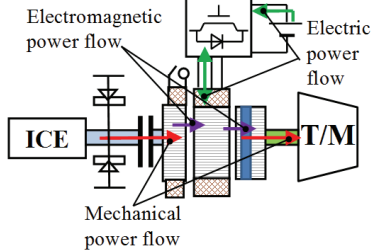


Fig. 1. Conventional range-extender HEV system.



(a) Radial-air-gap type.



(b) Axial-air-gap type.

Fig. 2. Proposed range-extender HEV system.

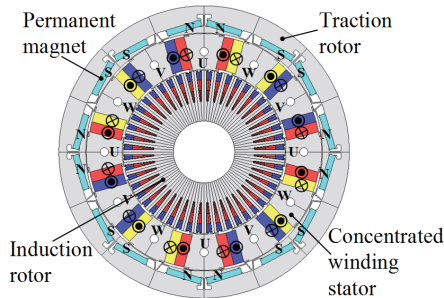


Fig. 3. Cross section of radial-air-gap type dual-axis motor for proposed range-extender HEV system.

2つのインバータが必要になる。

一方で、筆者らは上記の思想とは異なったアプローチで RE システムのコンポーネントを一体化させることができるシステムを検討している。Fig. 2 (a) に示すように1つのステータと2つのロータで構成され、二軸独立出力可能な構造としている。同図には一例としてラジアルギャップタイプの構造を示しているが、Fig. 2 (b) に示すようにアキシアルギャップタイプでも構成することができる。車両駆動軸に接続されるロータ (Fig. 2(a)においてはアウターロータ) は電機子巻線にて発生する基本波回転磁界に同期駆動する永久磁石形ロータ (PM ロータ) である。一方、ICE の出力軸に接続されるロータ (Fig.2(a)においてはインナーロータ) は基本波回転磁界に非同期回転する誘導ロータ (IM ロータ) である。EV モード時は電磁クラッチをリリースし、ステータ-PM ロータ間で電気-機械エネルギー変換が行われる。このとき、IM ロータの巻線の短絡結線回路は電磁クラッチに内包されており、クラッチの ON/OFF で短絡結線回路の ON/OFF 切替も同時にできるシステムとなっている。RE モード時はクラッチを結合し、ICE の機械エネルギーが IM ロータで再生電力に変換される。このとき PM ロータは出力電力と再生電力の差分エネルギーで駆動する。

一般的な IM ロータを用いた Fig. 2 (a) の構成の場合、ICE 回転速度 (N_{in}) が車両駆動軸回転速度 (N_{out}) よりも低い場合 ($N_{in} < N_{out}$)、(1) で定義するすべり s が正になり、IM ロータは力行駆動して ICE の出力軸が逆回転してしまう。上記理由により、著者らが過去に検討した RE システムのコンポーネント一体化システムは $s < 0$ のみに RE モードが限定されていた⁽¹⁰⁾。

$$s = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} \quad (1)$$

文献(10)の過去検討に対して、Fig. 2 のモータは IM ロータ巻線ピッチと結線方法に特長がある。Fig. 3 に Fig.2 (a) のラジアルギャップタイプで検討中の径方向断面図を示す。同図に示すように集中巻ステータを採用しているため、基本波回転磁界とは別に、基本波に対して逆相の第2次空間高調波回転磁界が不可避に発生する⁽¹¹⁾。一般に三相集中巻ステータと IM ロータを組み合わせた場合、IM ロータ巻線においては基本波回転磁界に対するすべり s_1 だけではなく、第2次空間高調波回転磁界に対するすべり s_2 も考える必要がある。そのため、従来の設計思想の IM ロータを適用した場合はロータ電流波形が大きく歪み、駆動特性が著しく低下する原因となっていた。一方で筆者らは上記の2種類の回転磁界が不可避に発生する点に着目し、2種類の周波数 (基本波を F_1 、第2次を F_2) からロータ起電力を得て、それぞれが極力相互干渉しないようにすることを考えた。基本波回転磁界に対するすべり s_1 が正の場合においてもロータ側の誘導電流は2種類の回転磁界によって主に2つの周波数成分 (s_1F_1 と s_2F_2) が発生する。ここで IM ロータは基本波回転磁界にカップリングする巻線ピッチで巻かれたロータ巻線 (C_{1st}) と第2次空間高調波回転磁界に対してすべり周波数の誘起電圧を発生させるロータ巻線 (C_{2nd}) の2つを備えた構造とし、 C_{1st} と C_{2nd} のターン数を調整することで基本波回転磁界に対するすべり s_1 から得ることができるロータ起磁力 F_{r1} と第2次空間高調波に対するすべり s_2 から得ることができるロータ起磁力 F_{r2} のバランスを調整する。 $s_1 > 0$ の場合において、 $F_{r1} < F_{r2}$ となるようにすればロータ側の主な誘導電流の周波数は基本波回転磁界の周波数 F_1 よりも高くなるため、回生トルクを発生させることができる。

本稿では上記の RE システムの要素技術としてすべり s_1 が正の場合においても回生トルク駆動できる誘導ジェネレータについて提案し、電磁界解析によりスロットコンビネーションの検討を行った結果を報告する。

2. ブラシレス二次励磁誘導ジェネレータの原理

前章で述べたとおり、集中巻ステータは各相巻線が重なり合わないため、基本波回転磁界に加えて不可避に基本波に対して逆相の第2次空間高調波回転磁界が発生する。上記の2つの回転磁界からそれぞれ誘導起電力を得てすべりが正の場合においても回生トルク駆動させるためには C_{1st} と C_{2nd} の巻線ピッチが重要となる。Fig. 4 に示すように基本

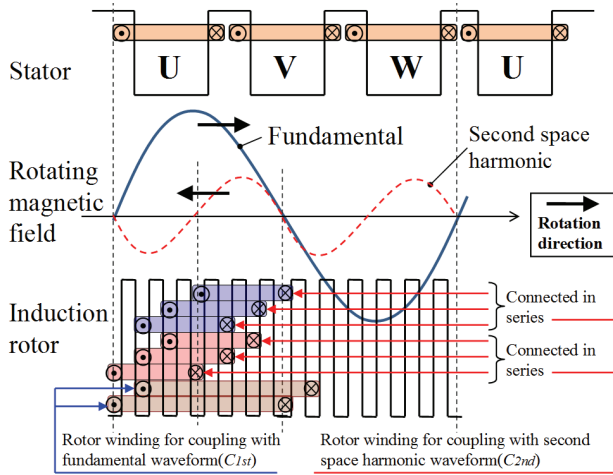


Fig. 4. Induction rotor winding pitch.

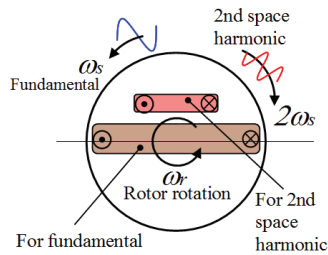


Fig. 5. Rotating magnetic field generated by concentrated winding stator.

波回転磁界にカップリングさせ、第2次空間高調波回転磁界にはカップリングしないようにさせるためには C_{1st} の巻線ピッチを基本波回転磁界の半周期分にすれば良い。このとき第2次空間高調波回転磁界に対しては1周期分の巻線ピッチになるため、第2次空間高調波に対してはカップリングしない。一般的なかご形IMロータのようにエンドリングで短絡結線させるのではなく、上記ピッチで巻いた C_{1st} を波巻にして独立させる。

次に、第2次空間高調波回転磁界に対してすべり周波数の誘起電圧を発生させる C_{2nd} は Fig. 4 に示すように第2次空間高調波の半周期分の巻線ピッチにする。極力、基本波回転磁界とのカップリングの影響を低減するため、電気角半周期に対してIMロータのスロット数が6の場合、第2次空間高調波の1周期に対して C_{2nd} を3直列3並列結線させる。 C_{1st} と同様に、3直列3並列結線した C_{2nd} は隣りの3直列3並列結線回路とは結線せず、独立させる。

上記のような巻線ピッチで誘導ロータ巻線 C_{1st} と C_{2nd} を巻くことで Fig. 5 に示すように2種類の回転磁界から誘導起電力を得ることができる。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 はそれぞれ以下のように表すことができる。

$$s_1 = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2)$$

$$s_2 = \frac{2\omega_s - (-\omega_r)}{2\omega_s} = \frac{2\omega_s + \omega_r}{2\omega_s} \quad (3)$$

ここで ω_r は誘導ロータの角速度、 ω_s は基本波回転磁界の角速度、 $2\omega_s$ は第2次空間高調波の角速度である。例えば、誘

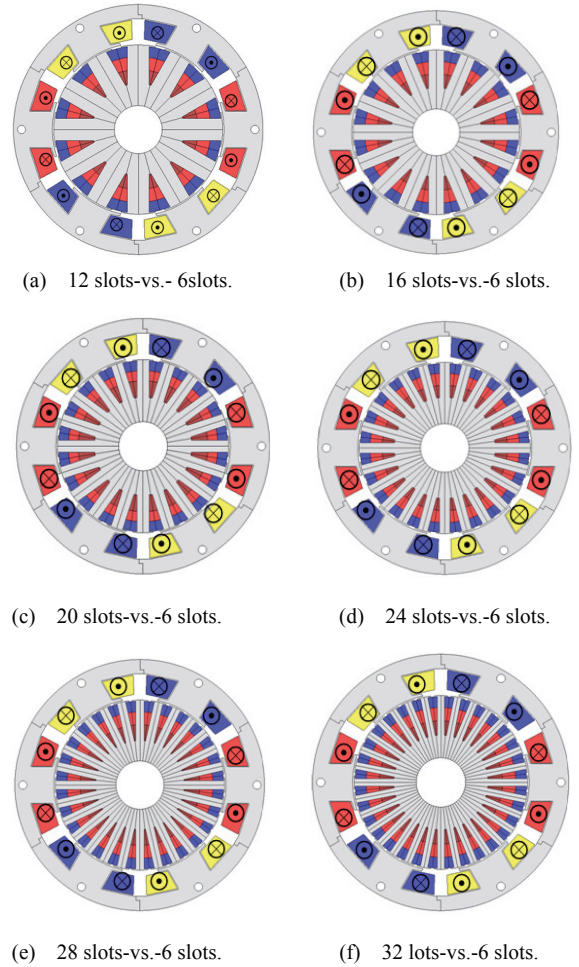


Fig. 6. Slots combination.

Table I. Rotor winding coil-pitch and connection pattern.

	12s	16s	20s	24s	28s	32s
Pole-pitch (teeth)	3	4	5	6	7	8
C_{1st} winding coil-pitch (teeth)	3	4	5	6	7	8
C_{2nd} winding coil-pitch (teeth)	1	2	2	3	3	4
Number of C_{2nd} series connection	1	2	2	3	3	4
Number of C_{2nd} parallel connection	2					

導ロータの回転速度 $N_r = 500$ r/min、基本波回転磁界の速度 $N_s = 1000$ r/min、第2次空間高調波回転磁界の速度 $2N_s = 2000$ r/min とすると、(2)および(3)より $s_1 = 0.5$, $s_2 = 1.25$ となる。このとき、 C_{2nd} に発生する誘導電流の周波数は基本波回転磁界よりも高い周波数になるため、回生トルクを発生させることができる。 C_{1st} と C_{2nd} のターン数比を調整することで基本波回転磁界に対して誘導ロータがすべり正 ($s_1 > 0$) の場合でも C_{2nd} で発生する第2次空間高調波で誘起されるロータ起磁力 F_{r2} が C_{1st} で発生する基本波回転磁界で誘起されるロータ起磁力 F_{r1} を上回っていれば回生トルクを得ることができる。 C_{1st} と C_{2nd} のターン数比は今回は $C_{1st} : C_{2nd} = 2$ ターン : 10 ターンとした。最適なコイルターン数比の検討については今後の課題とする。

3. スロットコンビネーションの検討

集中巻構造の誘導電動機の場合、前章で述べた主要な 2 種類の回転磁界以外に第 5 次や第 7 次空間高調波回転磁界が重畳している。厳密には第 5 次や第 7 次空間高調波に対しても誘導ロータが滑っていることになり、ロータ巻線で意図しない周波数の誘導起電力が発生してしまう。さらにステータティース数が分布巻よりも少なく、磁束が集中的に鎖交するため、スロットコンビネーションによっては瞬時的なブレーキトルクが発生してトルク低下やトルクリプル増加の悪影響をもたらす。そこで小型原理検証機による実機検証を見据え、三相 4 極 6 スロットの集中巻ステータをベースにしてロータスロット数の最適化検討を行う。ここで誘導ロータの巻線ピッチは前章の考え方に従い設計する。

〈3・1〉 スロットコンビネーション Fig. 6 に本稿で検討するスロットコンビネーションでモデル化した集中巻誘導ジェネレータの径方向断面図を示す。三相 4 極 6 スロットの集中巻ステータおよびエアギャップ長を 0.6 mm として、ロータスロットが 12 から 32 スロットまでのモデルを用いて性能比較を行う。Table 1 に示すように前章で述べた巻線ピッチでロータ巻線の結線をする。ロータのスロット数によってパーミアンス分布が異なるため、集中巻ステータで不可避に発生した第 2 次空間高調波に対する磁気結合係数が大きく異なる。Fig. 7 に電磁界解析ソフト (JMAG ver. 15) を用いて、Fig. 6 の各モデルにおいて第 2 次空間高調波分布を求めた結果 (同図右側) と参考に磁束密度分布 (同図左側) を示す。同図は電機子起磁力 389 A_{rms}T、基本波回転磁界の回転速度 1000 r/min ですべり $s_l = 0$ の結果である。同図より、どのスロットコンビネーションにおいても IM ロータに第 2 次空間高調波が鎖交していることを確認できる。前章のロータ巻線の考え方にに基づき、この 2 次空間高調波を誘導電流発生に活用する。

〈3・2〉 トルク特性 Fig. 8 に電機子起磁力 389 A_{rms}T 一定で励磁周波数を 16.67 Hz (500 r/min), 33.3 Hz (1000 r/min), 100 Hz (3000 r/min), 200 Hz (6000 r/min) と変化させたときの誘導ロータの回転速度 N_r -トルク T 特性を示す。同図より、極低回転域ではスロットコンビネーションによっては力行トルクになっているが全体を通してすべり $s_l > 0$ においても回生トルクになっていることが確認できる。Fig. 2 に示すレンジエクステンダー HEV システムへの適用を考えた場合、ICE のアイドル速度が 800 r/min ~ 1000 r/min のため、IM ロータの最低回転速度も 800 r/min ~ 1000 r/min を想定している。よって、極低回転域で力行トルクとなってもエンジン出力軸とロータ間のクラッチを OFF にして、電磁クラッチに内包された IM ロータの巻線の短絡結線回路も OFF になっているため問題ない。同図より、ロータスロット数が 12 slots もしくは 24 slots の場合が回生トルクが大きくなり発電効率が高くなると予測される。Fig. 9 にロータスロット数が 12 slots と 24 slots の場合における各励磁

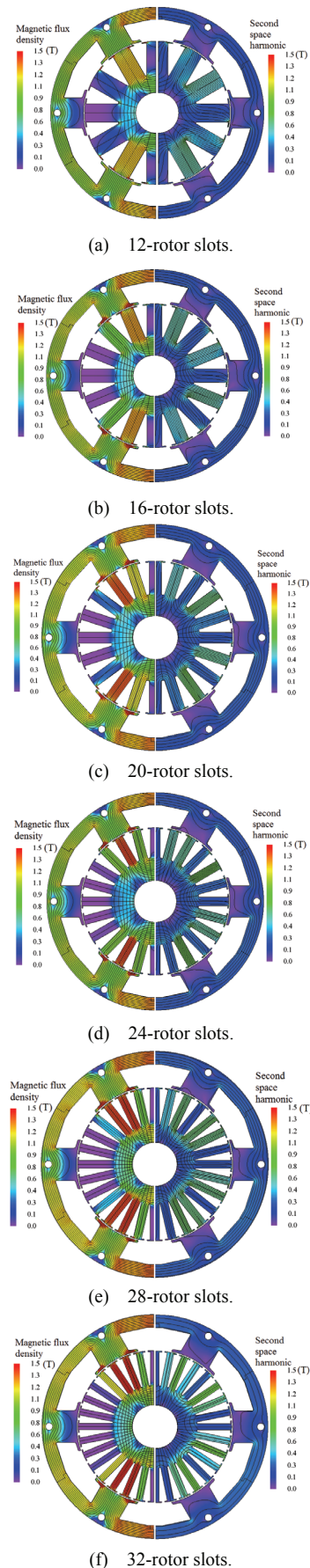
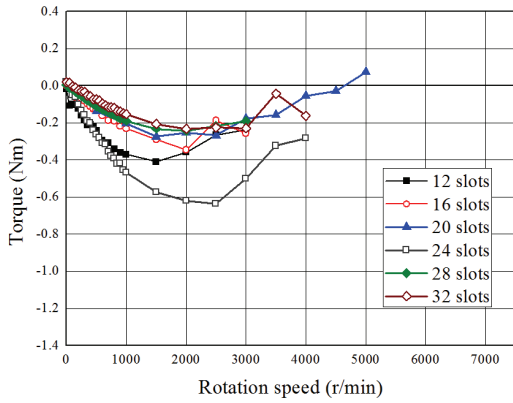
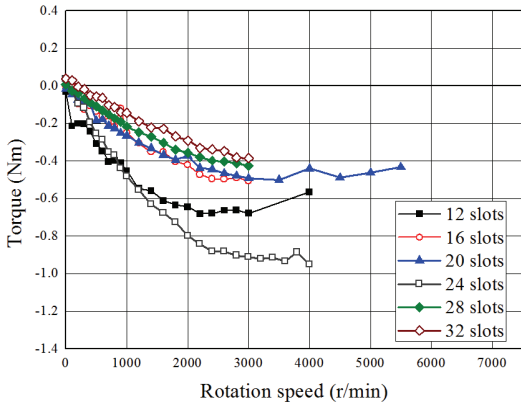


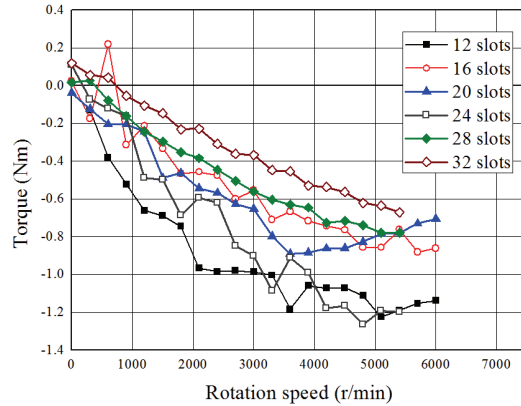
Fig. 7. Magnetic flux density (left-side) and second space harmonic (right-side) under 389 A_{rms}T.



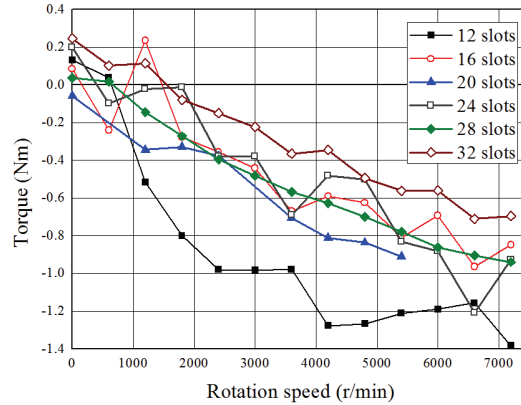
(a) Armature rotating magnetic field : 500 r/min. (16.67 Hz)



(b) Armature rotating magnetic field : 1000 r/min. (33.3 Hz)

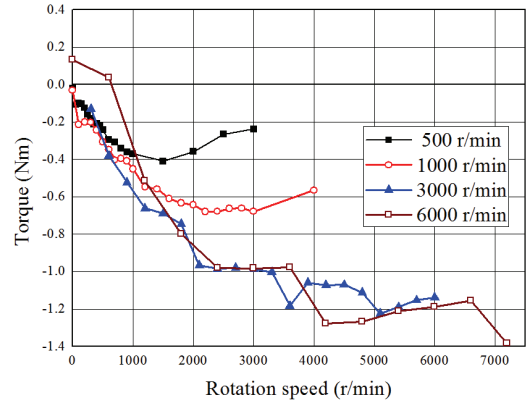


(c) Armature rotating magnetic field : 3000 r/min. (100 Hz)

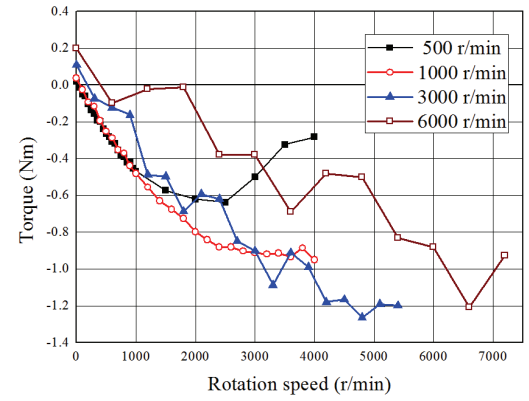


(d) Armature rotating magnetic field : 6000 r/min. (200 Hz)

Fig. 8. Rotation speed-vs.-torque characteristics under 389 A_{rms}T.



(a) 12-rotor slots.



(b) 24-rotor slots.

Fig. 9. Adjustable speed drive characteristics under 389 A_{rms}T.

周波数（基本波回転磁界の速度）に対する可変速特性を示す。同図から 12 slots は励磁周波数が高い場合に適しており、24 slots は励磁周波数が低い場合に適していることがわかる。Fig. 2 に示すレンジエクステンダー-HEV システムへの適用を考えた場合、ICE の燃効率が良い駆動点で IM ロータを制御するのが望ましい。さらに Fig. 2 および 3 の T/M 軸に接続された電機子の励磁周波数に同期回転するアウターロータは運転者のアクセル開度等により駆動周波数が決められる。すなわち、IM ロータの回生トルクが高くなるように設計すべき励磁周波数は搭載車種の常用領域によって決められる。

〈3・3〉 ロータ巻線起磁力 前節は $C_{1st} : C_{2nd} = 2$ ターン : 10 ターンのロータ巻線ターン数比で検討を行っていたが、本節ではロータスロット数が 24 slots の場合において、抵抗比を変更したときの性能比較を電磁界解析により行う。 C_{1st} は主に基本波回転磁界にカップリングするため、基本波回転磁界に対してすべり $s_1 > 0$ のときは力行トルク、すべり $s_1 < 0$ のときは回生トルクを発生させる。一方、 C_{2nd} は主に第 2 次空間高調波にカップリングするため、第 2 次空間高調波に対してすべり $s_2 > 0$ の場合でも基本波回転磁界よりも高い周波数のロータ電流が生じるため、回生トルクを生じる。すなわち、 C_{2nd} で発生する誘導電流を C_{1st} で発生する誘導電流よりも多くすることで基本波回転磁界に対してすべりが正の場合でも回生トルク駆動できるが、Fig. 4 に

示すように C_{2nd} は基本波回転磁界ともカップリングしている。 C_{2nd} の誘導電流を C_{1st} よりも多くなり過ぎると第 2 磁空間高調波に対する磁気遮蔽効果だけでなく、基本波電機子磁束に対しても磁気遮蔽効果が作用し、トルクが低下する恐れがある。これらについて電磁界解析により検証する。基礎検討として、基本波回転磁界が 100 Hz (3000 r/min) でロータ回転速度が 2100 r/min の駆動点 ($s_1 = 0.3, s_2 = 1.35$) で検証する。コア形状とスロット内のロータ巻線ターン数は変更せず、抵抗比を Table II に示す 6 ケースで変化させた。Fig. 10 に 6 ケースにおける回生トルクの解析結果を示す。同図より、ターン数を変更させない場合、最適な C_{1st} と C_{2nd} の抵抗比の組み合わせが存在することが予測できる。Case 1 や 2 は C_{2nd} の抵抗値が高いため、第 2 次空間高調波に対して滑ることで発生する誘導電流が低くなりトルクが低下する。一方、Case 5 や 6 は C_{2nd} の抵抗値が低いため、第 2 次空間高調波に対して滑ることで発生する誘導電流が大きくなり第 2 次空間高調波磁束に対して磁気遮蔽効果が作用してトルクが低下する。同時に前述のとおり、巻線ピッチの都合上、 C_{2nd} は基本波回転磁界ともカップリングして誘導電流が生ずるため、基本波電機子磁束に対しても磁気遮蔽効果が作用してトルクが低下していることを確認できる。今回の基礎検討を踏まえ、今後、その他の駆動点においてもトルク特性を確認しながら最適なロータ巻線起磁力について検討を進める。

4. まとめ

本稿では、1 対のモータインバータ構成で構成できる RE システムの要素技術としてすべりが正の場合においても回生トルク駆動できる誘導ジェネレータについて提案し、電磁界解析によりスロットコンビネーションの検討を行った。基本波回転磁界と集中巻ステータで不可避に発生する第 2 次空間高調波の 2 種類の周波数に誘導ロータ巻線ピッチを工夫することでそれぞれカップリングさせて、すべりが正の場合でも回生トルク駆動できることについて説明した。また、電磁界解析によりスロットコンビネーションに対する基礎的な駆動特性を明らかにした。その結果、提案する RE システムの常用領域が低回転側の場合はロータ:ステータのスロット数比は 2:1 系列が適しており、一方で常用領域が高回転側の場合は 4:1 系列が適していることがわかった。今後は基本波回転磁界にカップリングするロータ巻線と第 2 次空間高調波にカップリングするロータ巻線のターン数および抵抗値のバランス検討と、構造設計および原理検証機実機試作を行い、実際の駆動特性や効率マップ等を明らかにする予定である。

文 献

(1) U. Keller, T. Godecke, M. Weiss, C. Enderle, and G. Henning: "Diesel Hybrid -The Next Generation of Hybrid Powertrains by Mercedes-Benz", *33rd International Vienna Motor Symposium 2012*.

Table II. Rotor winding configuration in case of 24-rotor slots.

	C_{1st}		C_{2nd}	
	Number of turn	Resistance (Ω)	Number of turn	Resistance (Ω)
Case 1	2	0.1	10	0.70
Case 2		0.3		0.60
Case 3		0.5		0.50
Case 4		1.0		0.25
Case 5		1.2		0.15
Case 6		1.3		0.10



Fig. 10. Regenerating torque characteristics with respect to induction rotor winding configuration under 389 A_{rms}T and $s_1 = 0.3$ in case of 24-rotor slots.

(2) http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/e_power.html

(3) <https://bmw-i.jp/BMW-i3/>

(4) http://www.suzuki.co.jp/about/csr/report/pdf/2010_envj_all.pdf, p.28.

(5) R. Shimizu, H. Kinoshita, T. Ito, K. Mori, J. Inada, N. Saio, and H. Suumen: "Introduction of Range Extender Unit using Rotary Engine Technology", *Mazda Technical Review 2015*, No. 32, pp.191-196 (2015).

(6) S. Jurkovic, K. Rahman, B. Bae, N. Patel, and P. Savagian: "Next Generation Chevy Volt Electric Machines: Design, Optimization and Control for Performance and Rare-Earth Mitigation", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, pp.5219-5226 (2015).

(7) J. Wolschendorf, K. Rzemien, and D. J. Gian: "Development of Electric and Range-Extended Electric Vehicles through Collaboration Partnerships", *ESAE International*, No. 2010-01-2344, Published 10/19/2010.

(8) K. Moriya, S. Goto, T. Akita, H. Kosaka, et al.: "Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part3 -Novel Control Method of Linear Generator for to Improve Efficiency and Stability", *SAE Technical Paper*, No. 2016-01-0685, 2016, doi:10.4271/2016-01-0685.

(9) R. Virsik, and A. Heron: "Free Piston Linear Generator in Comparison to Other Range-Extender Technologies", *Electric Vehicle Symposium & Exhibition 2013 (EVS27)*, Barcelona, Spain, November 17-20, 2013.

(10) M. Aoyama, K. Nakajima, and T. Noguchi: "Preliminary Study of Permanent-Magnet-Free Electromagnetic Coupling Dual-axis Motor for HEV Application", *IEEJ Technical Meeting*, MD-16-063, RM-16-049, VT-16-018 (2016) (in Japanese).

(11) M. Aoyama, and T. Noguchi: "Experimental Verification of Radial-Air-Gap-Type Permanent-Magnet-Free Synchronous Motor Utilizing Space Harmonics with Auxiliary Poles", *IEEJ Trans. on IA.*, vol. 135, No. 8, pp. 869-881 (2015)(in Japanese)