

HEV用磁石フリー電磁結合形二軸モータの基礎検討

青山 真大*, 中島 一清 (スズキ) 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study of Permanent-Magnet-Free Electromagnetic Coupling Dual-axis Motor for HEV Application

Masahiro Aoyama*, Kazukiyo Nakajima (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a permanent magnet-free electromagnetic coupling dual-axis motor. The outer rotor is a wound-field type with a diode rectifier circuit for self-excitation by space harmonics, and the inner rotor is a wound type induction rotor with three-phase Y-connected windings. The outer rotor is magnetically designed with high saliency to pass the armature magnetic flux for the induction rotor, and it can improve the magnetic coupling coefficient between the inner rotor and the outer rotor. The inner rotor windings are mechanically shorted or opened. The mechanical structure for induction rotor winding connection selector is composed of a spring and a conductor. The induction rotor winding connection selector can short the induction winding connection in rotating by centrifugal force caused the conductor, and can open its winding connection in stopping. The operation principle of proposed motor is discussed. In addition, the drive performances are clarified by magnetic field analysis.

キーワード：電磁結合，磁石フリー，巻線界磁，自己励磁，ダイオード整流，誘導ロータ

(Keyword: electromagnetic coupling, permanent-magnet-free, wound-field, self-excitation, diode rectifier, induction rotor)

1. はじめに

近年，輸送機器の低エミッション化に向け，12V アイドリングストップシステムをベースにしたローエンドなハイブリッドシステムから数百Vの二次電池を用いて電動化割合を高めた高効率パワートレイン技術まで，様々な技術ポートフォリオが検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。その中でもストロングHEVシステムの小型化のために磁気ギアモータや電磁結合モータを用いたシステムが提案されている⁽³⁾⁽¹³⁾。前者は従来の遊星歯車とモータを組み合わせたシステムに対して二軸出力の磁気ギアモータを採用することで複合機能化によりコンポーネント数を減らすことができ，小型・軽量化・システム効率の向上が期待されている⁽³⁾⁽⁵⁾。しかし，動作原理上，高保磁力磁石を用いるとともに磁石渦電流損対策が必要になる⁽¹⁴⁾。加えて変調子出力に対して磁石ロータ（PMロータ）出力が過剰となる駆動モードの場合，ステータは回生モードとなる必要があるがバッテリーSOCが回生電力を受けだけの余裕がない場合に共線関係が成立しなくなりトルクを負荷することができなくなる。その対策として新たなインバータとステータもしくはモータで電気パスを設ける必要がありシステムの大型化と煩雑さが懸念される⁽³⁾。一方，後者はアウトター側にPMロータ，インナー側に二次励磁可能な巻線形誘導ロータ（IMロータ）の二軸出力モータを採用し，PMロータをドライブシャフト，IMロータ

をエンジン出力軸に直結したシステム構成としている⁽⁷⁾⁽¹³⁾。PMロータの磁石磁極はステータ側とIMロータ側に二層構造で同極配置されている。IMロータの励磁源はPMロータが電機子基本波回転磁界に同期回転することでPMロータの磁石磁極によって形成され，IMロータとPMロータが電磁結合される。ここで二次励磁しないモードではIMロータをすべり s が負（PMロータ回転速度 N_{out} よりもIMロータ回転速度 N_{in} が速い条件）で駆動することでIMロータは回生トルクを発生し，反作用トルクでPMロータに力行トルクを磁気伝達することが可能となる。すなわち，エンジントルクを磁気結合でドライブシャフトに伝達することが可能となる。しかし，PMロータとIMロータ間の磁気結合を向上させるために同極PMを二層配置した並列磁気回路のため磁石使用量が増加してしまう問題があった。さらに，電磁結合トルク量の調整と $s > 0$ ($N_{out} > N_{in}$)の条件でも駆動できるようにIMロータ巻線にスリップリングを介して誘導電流の回生/給電が可能な二次励磁システムとなっているためシステムの煩雑化と堅牢性の低下が懸念される。

それらの課題に鑑み，後者の電磁結合モータを用いたHEVシステムについてクランキングモード以外で $s > 0$ の駆動モードを選択できないが，一方で低コスト，簡素化が可能な磁石フリー電磁結合モータを提案する。本稿では，従来技術の課題を述べた上で提案モータの駆動原理を説明し，電磁界解析により性能予測を行ったので報告する。

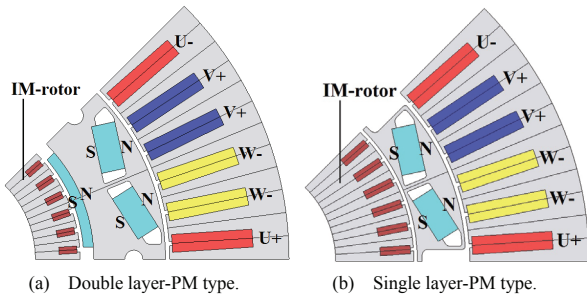
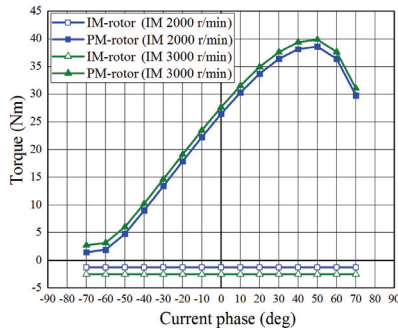
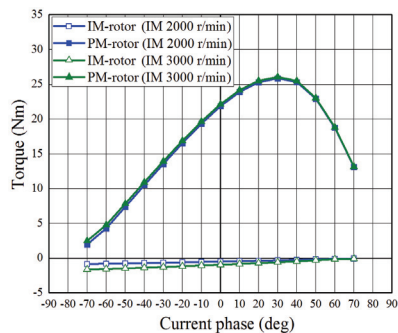


Fig. 1. Cross section of double layer and single layer PM type electromagnetic coupling dual-axis motor.



(a) Double layer-PM type.



(b) Single layer-PM type.

Fig. 2. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to IM-rotor speed for PM-rotor 1000 r/min.

2. 従来技術の電磁結合トルクにおける課題

従来技術（同極二層 PM 配置）と、従来技術をベースに磁石使用量低減のため一層 PM 配置の直列磁気回路に変更した 2 タイプの構造を図 1 に示す。本稿では小型原理検証機による実機評価を見据えてステータ外径 $\phi 120$ 、積厚 49.5 mm のコアサイズで検討を進める。図 2 に一定の電機子起磁力下における電流位相 - トルク特性を示し、図 3 に PM ロータの MTPA 点における磁束密度分布と磁束ベクトル図を示す。なお、電流位相角 0 deg が $+q$ 軸、 -90 deg が $+d$ 軸に対応しており、磁石磁極を d 軸と定義している。IM ロータはスリップリングに接続されておらず短絡結線されているもの（二次励磁していない）とする。各図より、二層 PM 配置は回転方向と逆側の磁石磁束が電機子磁束と対向することで磁気抵抗が高くなり、磁石磁束を有効的に活用できていない。さらに IM ロータの外径が小さいため、PM ロータに対して IM ロータトルクが低い。一方、一層 PM 配置は直列磁気回路構造としても PM ロータ間で磁束が閉磁路となつて

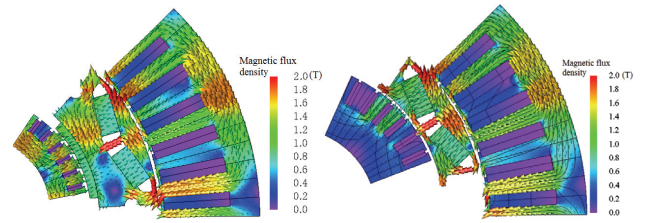
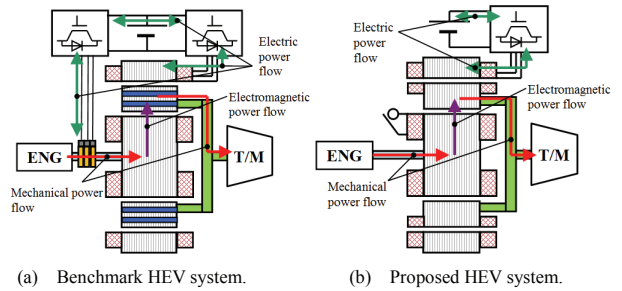
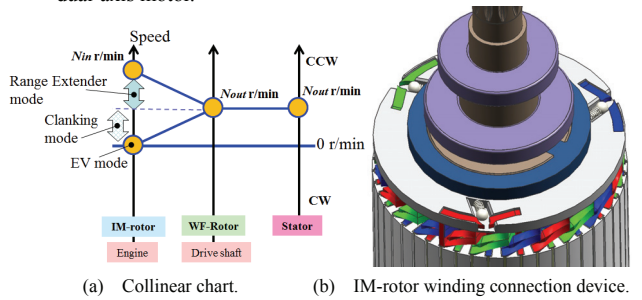


Fig. 3. Magnetic flux density and vectors under MTPA point of PM-rotor.



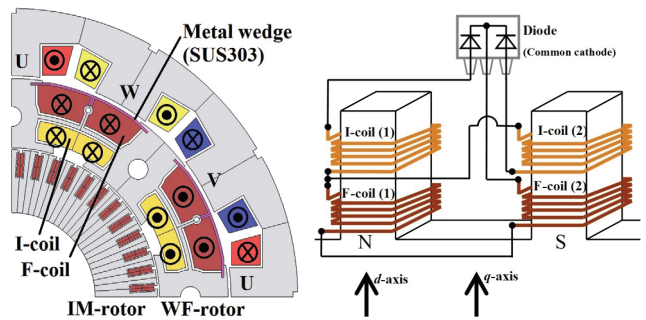
(a) Benchmark HEV system. (b) Proposed HEV system.

Fig. 4. HEV system applied electromagnetic coupling dual-axis motor.



(a) Collinear chart. (b) IM-rotor winding connection device.

Fig. 5. Mechanical configuration of IM-rotor winding connection device and collinear chart of proposed motor.



(a) Proposed motor. (b) WF-rotor winding connection.

Fig. 6. Proposed dual-axis motor.

おり IM ロータに磁束が鎖交せず、IM ロータトルクが低い。さらに IM ロータと PM ロータの MTPA 点が大きくずれてしまう。すなわち、従来システムでは二次励磁なしでは高効率システムの実現が困難であり、ブラシと二次励磁用インバータが必要であった。

3. 提案モータの駆動原理

〈3-1〉 モータ構造 図 4 に従来システムと提案システムを示す。システム面の大きな違いはエンジン動力の電気パスがなくなり、磁気伝達のためのレンジエクステンダー方

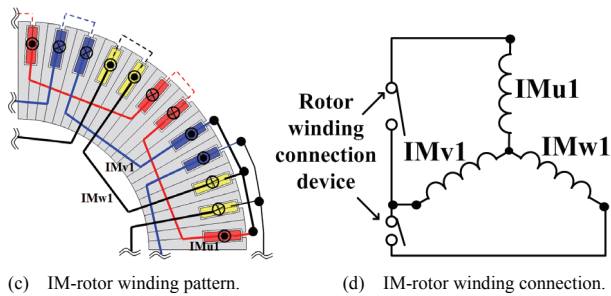


Fig. 7. Proposed motor and its IM-rotor winding connection.

式となっている。構造面ではドライブシャフトに連結されるアウターロータが PM ロータから巻線界磁ロータ (WF ロータ) に変更している点と二次励磁をしないシステムとしている。図 5(a)に示す EV モード (IM ロータ出力軸をエンジン出力軸から切り離し、ディスクブレーキで IM ロータの軸ロック) 時に IM ロータに誘導電流が流れドラッグトルクを生じるため、IM ロータコイル端部を開放状態して単なる磁路にする必要がある。システムの簡素化のため、図 5(b)に示す機械的なロータ巻線短絡開放制御装置をコイルエンド部に備え、遠心力で接点切り替えをする構造を採用し、IM ロータ停止 (0 r/min) 時はコイル端部が解放状態になる仕組みで検討している。図 6 に径方向断面図を示す。従来技術とは異なり、集中巻ステータでアウター側にバックヨークレスの自励式巻線界磁ロータ (WF ロータ)、インナー側に巻線形 IM ロータを内包した構造である。WF ロータは文献 (15)で実験検証されている集中巻ステータで不可避に発生する第 2 次空間高調波を界磁エネルギー源にダイオード整流回路で自励する原理で磁化する。IM ロータはオープン磁路となっている WF ロータ鉄心を介して集中巻ステータの基本波回転磁界と磁気結合する。加えて、WF ロータの自励により得られる界磁磁界とも磁気結合する。IM ロータ巻線は図 6 に示すように三相結線されており、端子は機械的なロータコイル短絡開放制御装置に接続されている。2 章で述べたとおり、従来の PM ロータタイプは PM ロータと IM ロータ間の磁気結合が低かったが図 6 に示す提案モータの構造とすることで磁気結合を向上できる。さらに、両ロータの MTPA 点が大きくずれるという問題があったが、順突極の直列磁気回路化した WF ロータにすることで従来技術の課題を解決することができる。

〈3・2〉 駆動原理 WF ロータは文献(15)と同様の原理に基づき、ステータ側エアギャップ面に誘導コイル (I-coil) を配置し、IM ロータ側エアギャップ面に界磁コイル (F-coil) を配置しており、効率的に静止座標系における第 2 次空間高調波 (基本波同期回転座標上における第 3 次時間高調波) を活用している。また、文献(16)では補極を突極間に設けて I-coil を q 軸に配置することで自励の向上を図っていたが今回は補極を設けておらず I-coil は突極 (d 軸) に配置している。提案モータの場合、IM ロータと WF ロータ間の磁気結合の向上が重要となるため、ステータ-WF ロータ-IM ロータ間の直列磁気抵抗を最小且つ、並列磁気抵抗を最大に

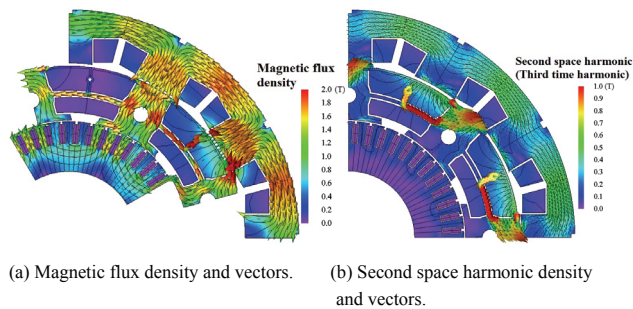
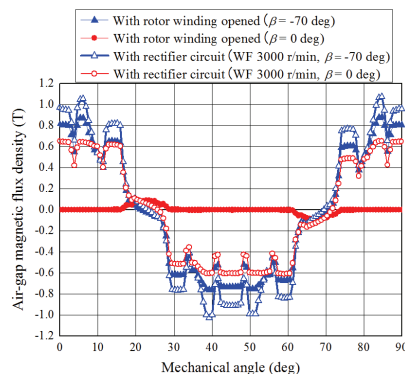
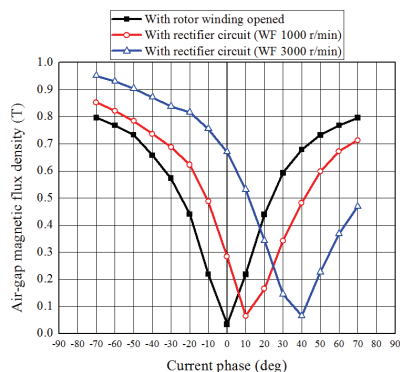


Fig. 8. Proposed motor and second space harmonic vectors for field magnetization.



(a) Gap magnetic flux density between WF-rotor and IM-rotor.



(b) Gap magnetic flux density with respect to current phase.

Fig. 9. Air-gap magnetic flux density between IM-rotor and WF-rotor with respect to armature current phase.

する磁気回路設計が望ましく、図 8(a)に示すように電機子磁束が IM ロータに多く鎖交する設計としている。なお、 q 軸に突極を設けているが、図 8(b)に示すように I-coil に鎖交する第 2 次空間高調波を増加させる目的で設置している。

図 9 に IM ロータと WF ロータ間のギャップ磁束波形とその基本波振幅の電流位相依存性を比較した図を示す。電流位相基準は U 相電機子巻線と N 極方向に巻かれた F-coil を備えた WF ロータ突極 (d 軸) が一致する位置である。解析条件は①WF ロータ巻線を開放で 1000 r/min 駆動の場合、② WF ロータ巻線を整流回路結線し 1000 r/min 駆動した場合と③3000 r/min 駆動した場合の 3 ケースである。3 ケースともに IM ロータ巻線は開放でロック (0 r/min) している。同図から WF ロータと IM ロータが直列磁気回路のため電流位相によってギャップ起磁力が変化することがわかる。さらに②、③の駆動条件で WF ロータが自励磁化することでギャ

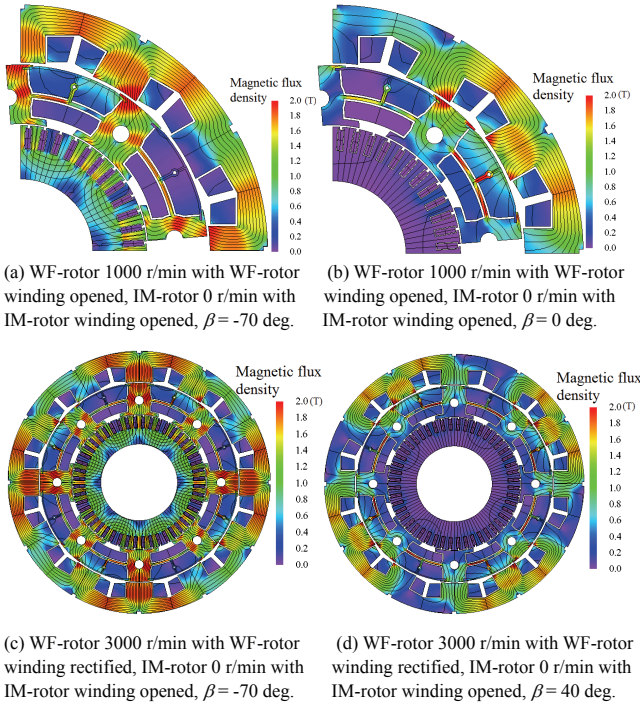


Fig. 10. Magnetic flux density.

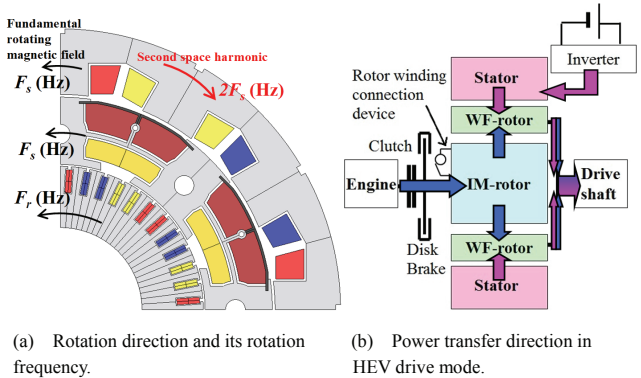


Fig. 11. HEV drive mode with proposed dual-axis motor.

ップ磁束密度が増加することが確認できる。この結果から IM ロータのトルクは WF ロータに対する相対速度に加えて電流位相と WF ロータの自励磁化量によっても変化することがわかる。図 10(a), (b)に WF ロータ巻線が開放状態で 1000 r/min 駆動, IM ロータ巻線が開放でロック (0 r/min) とした駆動条件において, 電流位相が -70 deg と 0 deg のときの磁束密度分布を示す。同図に示すように電機子磁束と突極ロータの磁路により IM ロータに鎖交する電機子磁束が変化することがわかる。図 9(c), (d)に WF ロータ巻線を整流回路結線し 3000 r/min 駆動, IM ロータ巻線が開放でロック (0 r/min) とした駆動条件において, 電流位相が -70 deg と 40 deg のときの磁束密度分布を示す。同図に示すように WF ロータが第 2 次時間高調波によって自励することで IM ロータに電機子磁束と WF ロータの界磁束が鎖交して磁束密度が増加していることがわかる。WF ロータが自励して界磁束が生じることで, 図 8(b)に示すように IM ロータに鎖交する磁束が低下する電流位相が遅角する。すなわち, 図 11 に示すように基本波回転磁界 F_s に WF ロータが同期して F_s で回

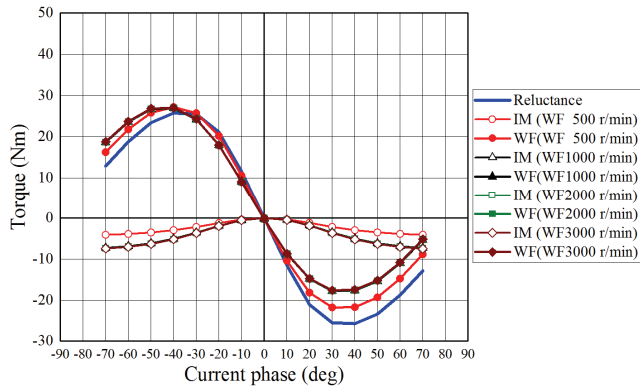
Table I. Specifications of prototype.

Number of WF-rotor poles	8	
Number of IM-rotor slots	48	
Number of stator slots	12	
Motor core outer diameter	120 mm	
Air-gap lengths	Stator - WF-rotor	0.6 mm
	WF-rotor - IM-rotor	0.4 mm
Axial length of core	49.5 mm	
Maximum magnetomotiveforce	750 A _{rms} T (60 s)	
Number of stator coil-turn	20	
Armature winding connection	4 parallel	
Number of WF-rotor induction coil-turn	61	
WF-rotor induction coil resistance	0.47 Ω / coil	
Number of WF-rotor field coil-turn	37	
WF-rotor field coil resistance	0.29 Ω / coil	
Number of IM-rotor coil turn	14	
IM-rotor coil resistance	0.15 Ω / coil	
Core material	30DH (Nippon steel)	

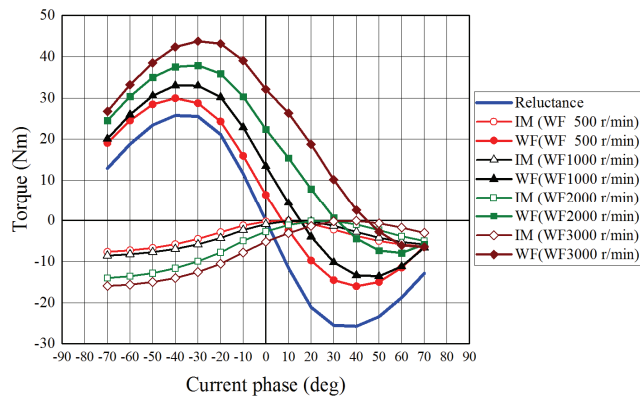
転し, IM ロータが基本波回転磁界よりも速い速度 ($F_s < F_r$) で駆動することで IM ロータに回生トルクが発生する。WF ロータに IM ロータの回生トルクが反作用トルクとして力行方向に作用することで IM ロータの動力を磁氣的に伝達することができる。さらに, 集中巻ステータで不可避に発生する基本波回転磁界と逆方向の第 2 次時間高調波 ($2F_s$) が基本波回転磁界と同方向に回転している WF ロータに鎖交することで第 3 次時間高調波として I-coil に誘導起電力を発生させる。その誘導起電力を図 6(b)の整流回路で全波整流することで WF ロータが自励し, リラクタンストルクに加えて電磁石トルクの活用できトルク密度が回転速度に比例して増加する。さらに WF ロータと IM ロータ間の磁気結合が向上し, IM ロータから磁氣的に伝達される動力が向上する。

4. 提案モータの駆動特性

〈4・1〉 電流位相-トルク特性 電磁界解析により提案モータの駆動特性を予測する。表 1 に提案モータの主要な諸元を示す。実機検証を見据えてダウンサイズしたモデルで設計している。WF ロータの自励による効果を明らかにするため, WF ロータ巻線を開放にした場合と整流回路結線した場合で電流位相トルク特性を解析した。図 12 に電機子起磁力 750 A_{rms}T の励磁条件下で WF-rotor の回転速度を変化させたときの WF ロータと IM ロータのトルクを示す。IM ロータの速度は WF ロータの速度が 500 r/min のとき 1500 r/min (すべり $s = -2.0$), 1000 r/min のとき 2000 r/min (すべり $s = -1.0$), 2000 r/min のとき 4000 r/min (すべり $s = -1.0$), 3000 r/min のとき 5000 r/min (すべり $s = -0.67$) である。また, リラクタンストルクは IM ロータ巻線を開放でロックし, WF ロータ巻線を開放にしたときの結果である。同図より, WF ロータの自励により WF ロータと IM ロータ間の磁



(a) With WF-rotor winding opened.



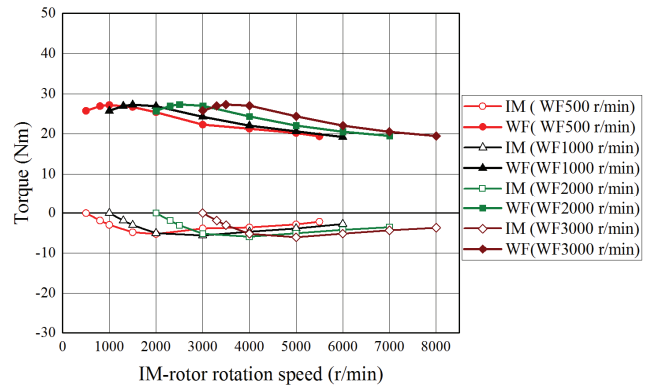
(b) With WF-rotor winding rectified.

Fig. 12. Current phase-vs.-torque characteristics with respect to WF-rotor rotation speed.

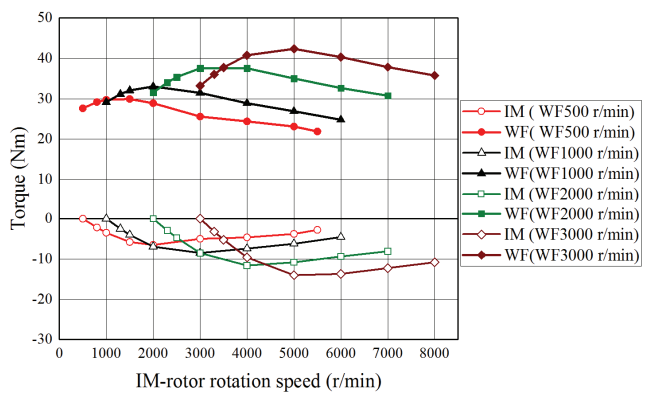
気結合が向上し IM ロータの回生トルクが増加していることがわかる。IM ロータトルクの電流位相依存性は図 9 の IM ロータと WF ロータ間のギャップ磁束密度と同じ傾向を示していることが確認できる。

〈4.2〉 すべりトルク特性 図 13 に電機子起磁力が $750A_{rms}T$ 、電流位相 $\beta = -40 \text{ deg}$ で励磁したときの IM ロータ速度 (すべり) による WF ロータと IM ロータのトルク特性を示す。図 13(a) に示すように WF ロータが自励していないとき WF ロータはリラクタンストルクのみとなる。IM ロータは励磁磁束が不変 (電機子磁束のみ) のため相対速度に対するトルク特性に変化がない。一方, WF ロータが自励しているとき, WF ロータにおいてリラクタンストルクと回転速度に比例する電磁石トルクが発生し, IM ロータは回転速度に比例して励磁磁束が増加する (電機子磁束と回転速度依存性のある界磁束) のでトルクが増加する傾向となる。

〈4.3〉 現時点の課題 図 4 (b) の提案するシステムで EV モード (IM ロータをロックし, IM ロータ巻線を開放) と HEV モード (IM ロータをすべり負で駆動し, IM ロータ巻線を短絡結線) で駆動したときの電機子起磁力 $750A_{rms}T$ における電流位相-トルク特性を図 13 に示す。同図にて WF ロータの力行トルク MTPA 点と比較する。WF ロータが 1000 r/min のとき EV モードに対して HEV モードは 1.93 Nm トルクが増加しており, IM ロータの回生トルクの 27.8% に相当する。WF ロータが 3000 r/min のとき EV モードに対して



(a) With WF-rotor winding opened.



(b) With WF-rotor winding rectified.

Fig. 13. Adjustable speed drive characteristics with respect to IM-rotor rotation speed increase in current phase -40 deg .

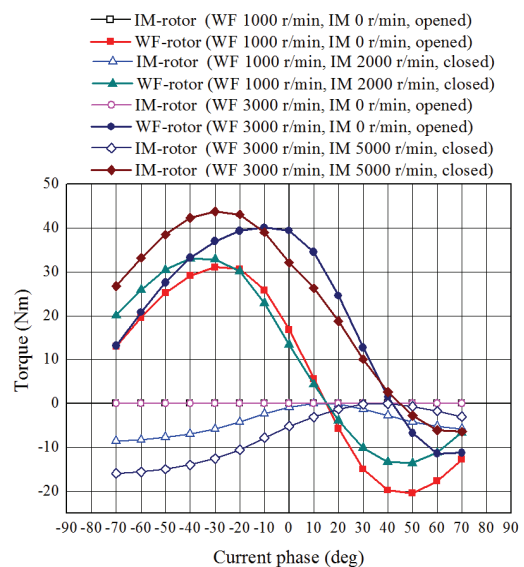


Fig. 14. Current phase-vs.-torque characteristics compared with HEV drive mode and EV drive mode in proposed HEV system.

HEV モードは 3.63 Nm トルクが増加しており, IM ロータの回生トルクの 29% に相当する。一方で図 15 に同条件におけるベンチマーク (図 1(a) の二層 PM 配置) のリラクタンストルク (磁石は未着磁) と IM ロータの電流位相-トルク特性を示す。同図より, ベンチマークの場合は IM ロータ回生ト

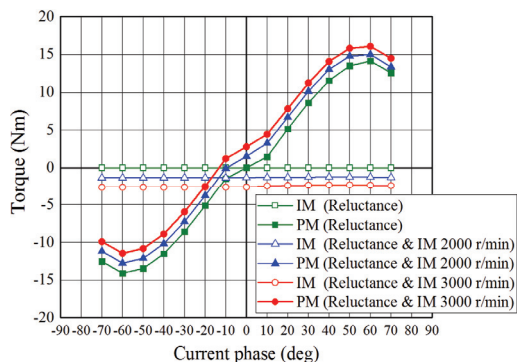


Fig. 15. Current phase-vs.-torque characteristics of benchmark double layer-PM type without permanent magnet of stator side.

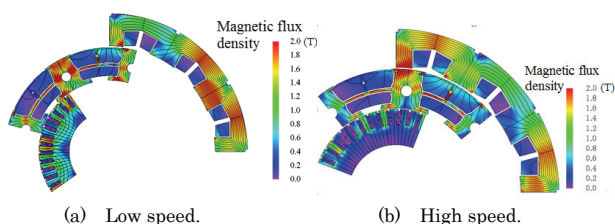


Fig. 16. Magnetic flux density with respect to WF-rotor speed and IM-rotor speed increase.

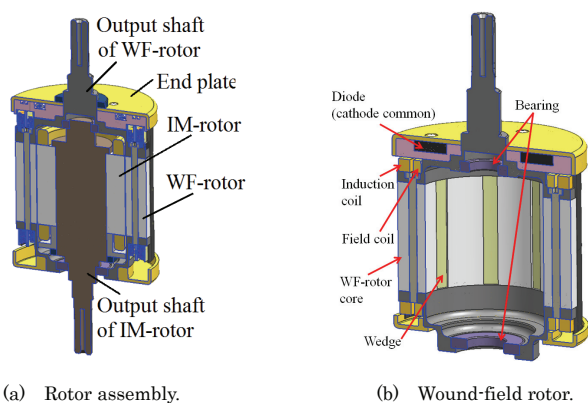


Fig. 17. Rotor configuration of prototype.

ルクが反作用トルクとして 100 %電磁結合により動力伝達できていることがわかる。提案モータの場合、スリップリングによる二次励磁を不要にするため、オープン磁路の WF ロータ鉄心を介して IM ロータと集中巻ステータで発生する基本波回転磁界の磁気結合を向上させている。そのため、図 16 に示すように高回転域では IM ロータで発生した誘導電流によって主磁束の磁気遮蔽が生じ、直列磁気抵抗が増加する。すなわち、IM ロータ回生トルクは電磁結合トルクとして WF ロータに 100 %動力伝達できているが、一方で WF ロータの主磁束が低下して WF ロータの電磁石トルクとリラクタンストルクが低下していると考えられる。これらのことから、IM ロータの起磁力、WF ロータの起磁力、電機子起磁力のバランス設計が重要になることがわかる。

5. まとめ

本稿では、従来の電磁カップリングモータを用いた HEV

システムの低コスト化と簡素化を目的に磁石フリー電磁結合形二軸モータを用いたレンジエクステンダー-HEV システムを提案した。提案モータの動作原理の説明と基礎特性について電磁界解析により性能を明らかにした。今後は、各起磁力が諸性能に及ぼす影響を明らかにしながら電磁結合による動力伝達割合向上の検討に取り組む。さらに図 17 に示すロータ構造で実機試作を行い、駆動原理の実機検証を行うとともに、HEV システムまで含めた最適な制御モデルの構築を進める予定である。

文 献

- (1) S. Jurkovic, K. M. Rahman, P. Savagian, and R. Dawsey: "Electric Traction Motors for Cadillac CT6 Plugin Hybrid-Electric Vehicle", *SAE Technical Paper* 2016-01-1220, doi:10.4271/2016-01-1220 (2016)
- (2) R. Mizutani: "Technical Feature and Subjects of Traction Motors for EV/HEV", *IEEJ Technical Meeting*, VT-13-026 (2013) (in Japanese)
- (3) Black, D. T., Calverley, S. D., and Birchall, J. G.: "The Delivery of Magnetic Powersplit Technology", *JSAE Annual Congress Proceedings* (Spring), No. 20165062, pp.326-333 (2016)
- (4) J. Wang, K. Atallah, and S. D. Carvley: "A Magnetic Continuously Variable Transmission Device", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 47, No. 10, pp. 2815-2818 (2011)
- (5) M. Fukuoka, K. Nakamura, H. Kato, and O. Ichinokura: "A Novel Flux-Modulated Type Dual-Axis Motor for Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 50, No. 11, doi:10.1109/TMAG.2014.2327646 (2014)
- (6) Dimitroff Waltschiff Dimo: "Electromagnetic Transmission Torque Converter", *US patent* US 2864016 A (1958)
- (7) Nordlund, E., and Sadarangani, C.: "The Four-Quadrant Energy Transducer", *Proc. Of IEEE Industrial Application Society Meeting*, 10:13-18 (2002)
- (8) Eriksson, S., and Sadarangani, C.: "A Four-Quadrant HEV Drive System", *Proc. of IEEE Vehicular Tech. Conf.*, 1510-1514 (2002)
- (9) E. Vinot, R. Trigui, Y. Cheng, C. Espanet, A. Bouscayrol, and V. Reinbold: "Improvement of an EVT-based HEV Using Dynamic Programming", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.* vol. 63, No. 1, pp. 40-50, doi:10.1109/TVT.2013.2271646 (2013)
- (10) 梶浦裕章・瀬口正弘・伴在慶一郎: 「車両用駆動装置」, 特開平 9-46815 (published in 1995) (in Japanese)
- (11) 渡辺隆男・土屋英滋・西澤博幸: 「動力伝達装置」, 特開 2009-033917 (published in 2007) (in Japanese)
- (12) T. Watanabe, E. Tsuchiya, M. Ebina, and Y. Osada: "High Efficiency Electromagnetic Torque Converter for Hybrid Electric Vehicle", *SAE Int. J. Alt. Power*, 5(2):2016, doi:10.4271/2016-01-1162 (2016)
- (13) S. Asami, T. Watanabe, S. Tominaga, and A. Murakami: "New Slip Ring System for Electromagnetic Coupling in HEV Driveline", *SAE Technical Paper* 2016-01-1222, doi: 10.4271/2016-01-1222 (2016)
- (14) T. Tonari, H. Kato and H. Matsui: "Study on Iron Loss of Flux Modulated Type Dual-Axis Motor", *IEEJ Technical Meeting*, RM-13-142 (2013) (in Japanese)
- (15) 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)
- (16) M. Aoyama, and T. Noguchi: "Torque Performance Improvement of Self-Excited Permanent-Magnet-Free-Synchronous Motor with Rotor Auxiliary Poles Utilizing Space Harmonics", *IEEJ Trans. on IA.*, vol. 136, No. 2, pp.169-181 (2016) (in Japanese)