

永久磁石ロータと巻線形誘導ロータを備えた二重ロータ式 磁気動力伝達機構へのブラシレス二次励磁技術の基礎研究

青山 真大* (スズキ) 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study of Brushless Doubly-Fed Technique for Double-Rotor Type Electromagnetic Power Transmission System
with Permanent-Magnet Rotor and Wound Type Induction Rotor
Masahiro Aoyama* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes an electromagnetic coupling dual-axis motor in which the outer rotor, i.e., permanent-magnet rotor is connected to the transmission, and the inner rotor, i.e., three-phase wound-type induction-rotor with series-connected capacitor is connected to the ICE via a clutch. The unique point of this motor is the brushless doubly-fed scheme with resonant inductive coupling. The induction-rotor is composed of stacked magnetic steel plates area for the electromagnetic coupling between the induction-rotor and the permanent-magnet rotor, and soft magnetic composites area for the resonant inductive coupling between the induction-rotor and doubly-fed stator which is placed in axial-air-gap of induction-rotor. The rotor coils of induction-rotor are toroidally-wound. In this paper, the preliminary study of brushless doubly-fed technique and the operation principle are discussed through the FE-analysis. In addition, the drive performances are clarified by the simulation.

キーワード：電磁結合，二次励磁，電磁共振，トーラスコイル，動力伝達，巻線形誘導ロータ

(Keyword: electromagnetic coupling, doubly-fed, resonant inductive coupling, torus coil, power transmission, wound type induction rotor)

1. はじめに

近年、輸送機器分野における低エミッション社会実現に向け、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磁気動力伝達システムが提案されている⁽³⁾⁽¹⁵⁾。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⁽¹⁶⁾。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が回生電力を受ける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。例えば、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) で駆動する場合、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。一方、 $s > 0$ ($N_{out} > N_{in}$) の条件で駆動する場合、IMロータが力行トルクで反作用トルクを受けるPMロータが回生トルクになるが、ステータの電機子起磁力で力行トルクになる電流位相で駆動することで一部の動力を回生させながら差分電力でドライブシャフトに動力伝達をするこ

とが可能になる。しかし、従来のシステムはエンジンの動作点を高効率点で駆動することを目的に 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、本稿では後者の電磁結合モータを用いた HEV システムについて巻線形誘導ロータへブラシレス二次励磁できる要素技術について基礎検討を行う。二次励磁の方法として回転トランスやキャパシティブカップリングによる給電方法が検討されているがいずれも高周波励磁で非接触給電し、ロータ上で整流する同期モータ用途の検討である⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。一方、非同期モータへすべり周波数で AC 給電するためにはこれらの方法の場合、ロータ上で周波数変換する必要がある。そこで電磁共振結合による無鉄心誘導電動機の先行研究に着目し、コイルの Q 値 (Quality factor) ではなくコイル間の磁気結合係数 κ を高めて低周波で電磁共振結合することでブラシレス二次励磁できる要素技術を考案した⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。本稿では提案するシステム構成の説明と、電磁界解析により基礎特性を明らかにしたので報告する。

2. システム構成

Fig.1(a)にブラシを介して誘導ロータに二次励磁することでパワースプリットモード ($N_{in} > N_{out}$) とパワーサーキュレーションモード ($N_{in} < N_{out}$) で駆動可能な従来の HEV システムを示す⁽¹²⁾。Fig.1(b)にブラシレスで誘導ロータに二次励磁することで従来の HEV システムと同等の動作が可能な HEV システムを示す。提案システムの最大の特長はブラシレスで誘導ロータ巻線に二次励磁できる点である。構造上の特長として Fig. 2(a)に示すように巻線形誘導ロータのコイルをトロイダル巻にしている。ラジアルギャップ面はアウターロータ (PM ロータ) と磁気結合して動力を伝達し、アキシヤルギャップ面は電磁共振結合によりブラシレス二次励磁に活用する。二次励磁時にアキシヤルギャップ方向からの磁束がラジアルギャップ面に干渉しないようにラジアルギャップ面は電磁鋼板を積層し、アキシヤルギャップ面は SMC (Soft Magnetic Composites) とし、両コア間に非磁性体の板を挟み磁氣的に遮蔽している。さらに二次励磁しない場合、誘導ロータの磁束がアキシヤル方向に漏れてしまうことを防ぐために Fig. 2(b)に示すように二次励磁用のステータ (DF ステータ) は無鉄心ステータとしている。電磁共振で二次励磁するため、Fig. 2(c)に示すように DF ステータ巻線は三相 Y 結線で各相コイルに直列にキャパシタを接続している。誘導ロータは三相結線し、各相にキャパシタを直列接続して各相の電位はフローティング構成としている。

3. 電磁界解析による検討

〈3・1〉 ブラシレス二次励磁の基礎検討 最初に Fig. 2 の構成で電磁共振結合により誘導ロータ巻線にブラシレスで給電できるか否かの検討を行う。Fig. 3 に示すようにトロ

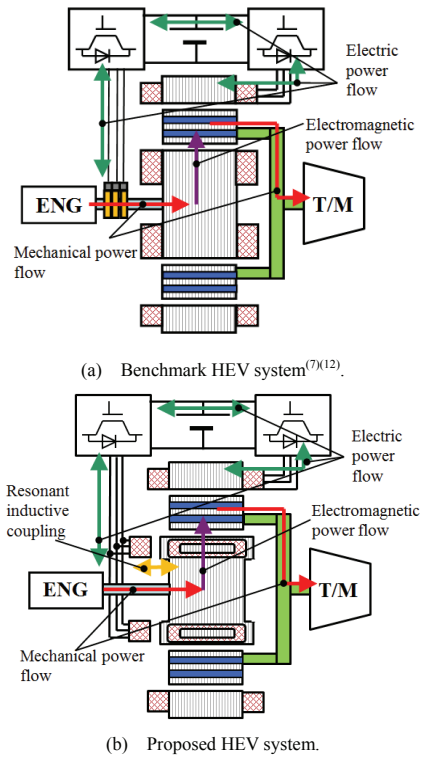


Fig. 1. HEV system applied electromagnetic coupling dual-axis motor.

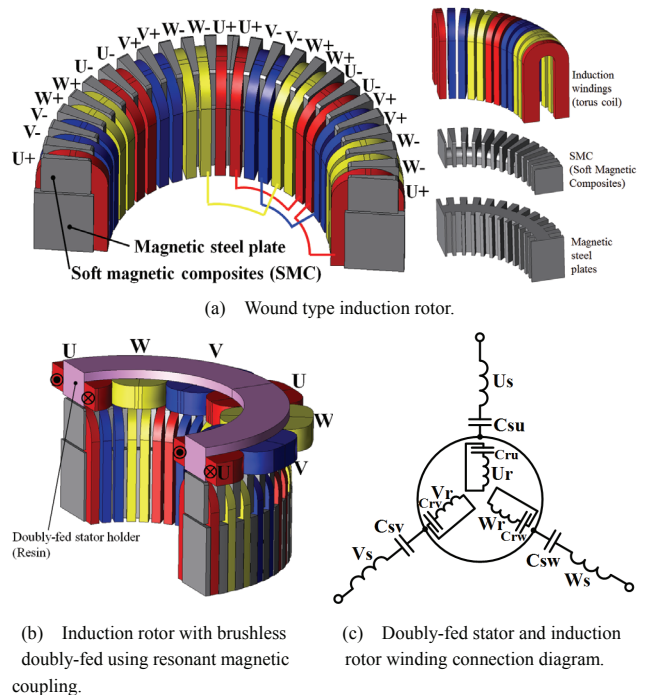


Fig. 2. Induction rotor design with brushless doubly-fed using resonant magnetic coupling.

イダル巻 IM ロータと DF ステータのみをモデリングし、二次励磁ステータの回転磁界の励磁周波数を一定にして IM ロータの回転速度を変化させたときのトルクを確認することでブラシレス二次励磁の基礎検討を行う。共振周波数 F_{res} は(1)で表される IM ロータのすべり s の常用領域で設定するのが望ましいが今回の基礎検証では $F_{res} = 200$ Hz とした。

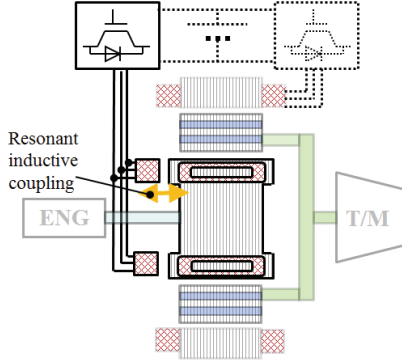
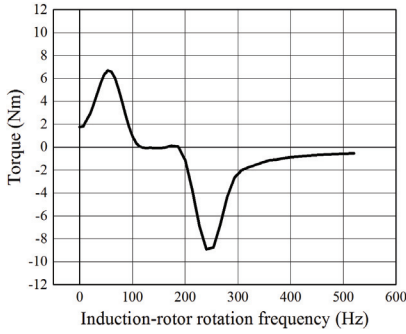
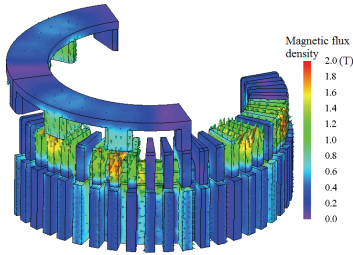


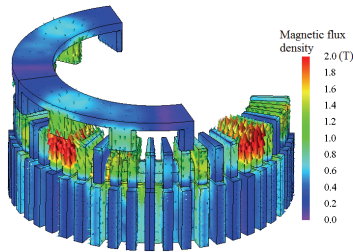
Fig. 3. Preliminary study of resonant inductive coupling between doubly-fed core-less stator and wound-type induction rotor with torus coils.



(a) Induction rotor-rotation frequency-vs.-torque characteristics under excitation frequency 150 Hz.



(b) Induction rotor rotation speed 800 r/min. (53.3 Hz, slip 0.64).



(c) Induction rotor rotation speed 3600 r/min. (240 Hz, slip -0.6).
Fig. 4. Preliminary study of resonant inductive coupling under excitation frequency of doubly-fed stator 150 Hz.

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

次に、以下の手順で DF ステータのインダクタンス L_{DF} と IM ロータのインダクタンス L_{IM} を電磁界解析により求める。

A) IM ロータ巻線にキャパシタを接続せず各相の電位はフローティング状態にして短絡結線。DF ステータ巻線にキャパシタを接続せず三相電流源で任意の電流振幅を電流位相 0 deg で $F_{res} = 200 \text{ Hz}$ にて励磁し、電圧位相 δ_{DF} を求

Table I. Specifications of prototype.

Number of stator poles	8
Number of stator slots	48
Number of PM-rotor poles	8
Number of IM-rotor poles	8
Number of DF-stator poles	8
Number of DF-stator slots	12
Air-gap lengths	Stator - PM-rotor 0.7 mm PM-rotor - IM-rotor 0.7 mm IM-rotor axial teeth - DF-stator coil 2.0 mm
Axial length of stator core	60 mm
IM-rotor winding connection per phase	8 series
Number of IM-rotor induction coil-turn	3
IM-rotor induction coil resistance	3.0 m Ω / coil
IM-rotor capacitance	50 mF
Number of DF-stator coil	26
DF-stator coil resistance	16.7 m Ω / coil
DF-stator capacitance	18 mF
PM-rotor magnet material	N39UH (Shin-Etsu chemical)
Magnetic steel plate material	35H-EA (Nippon steel & Sumitomo metal)
Soft Magnetic Composites (SMC) material	Somaloy700 3P (Höganäs)

め、(2)で L_{DF} を求める。ここで R_{DF} は DF ステータ巻線の抵抗値である。

$$L_{DF} = \frac{R_{DF}}{\omega} \tan \delta_{DF} = \frac{R_{DF}}{2\pi F_{res}} \tan \delta_{DF} \quad (2)$$

B) DF ステータ巻線にキャパシタを接続せずに開放状態にする。IM ロータ巻線にキャパシタを接続せず三相 Y 結線し、三相電流源で任意の電流振幅を電流位相 0 deg で $F_{res} = 200 \text{ Hz}$ にて励磁し、電圧位相 δ_{IM} を求め、(3)で L_{IM} を求める。ここで R_{IM} は IM ロータ巻線の抵抗値である。

$$L_{IM} = \frac{R_{IM}}{\omega} \tan \delta_{IM} = \frac{R_{IM}}{2\pi F_{res}} \tan \delta_{IM} \quad (3)$$

次に、(4)にて IM ロータと DF ステータの静電容量 (C_{IM} , C_{DF}) を決定する。

$$C_{IM \text{ or } DF} = \frac{1}{\omega^2 L_{IM \text{ or } DF}} = \frac{1}{(2\pi F_{res})^2 L_{IM \text{ or } DF}} \quad (4)$$

上記方法で決定したキャパシタ静電容量とその他のモータ主要諸元を Table I に示す。Fig. 4 に一例として DF ステータを三相電圧源 15 V_{pk} の周波数 150 Hz で印加し、IM ロータの回転速度に対するトルク特性を電磁界解析で求めた結果を示す。同図より、IM ロータの回転周波数が 53.3 Hz と 240 Hz をピーク値に共振していることがわかる。DF ステータの励磁周波数が 150 Hz なのでロータ上にはそれぞれ 96.7 Hz と 90 Hz のすべり周波数の二次電流を効率良く非接触給電できることになる。今後、コイル間の磁気結合係数 κ を高めてブラシレス二次励磁効率を向上させるために Fig. 5 に示すように DF ステータの樹脂ホルダー内にバックヨークレスの補極を配置し、最適な磁気回路について検討を進める。
〈3・2〉 磁氣的な動力伝達の検討 次に電磁共振結合で誘導ロータ巻線にブラシレス給電しながら、PM ロータと IM

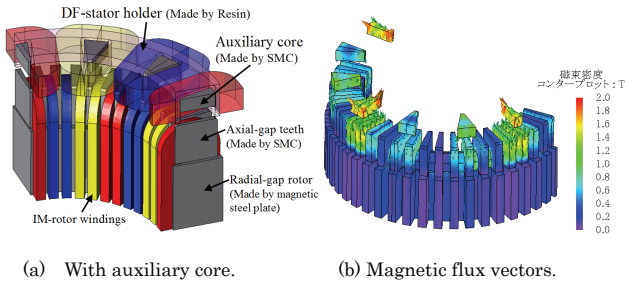


Fig. 5. Magnetic coupling improvement with auxiliary core.

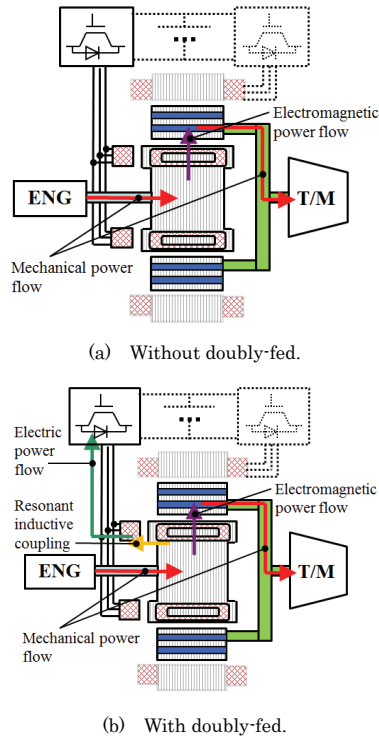
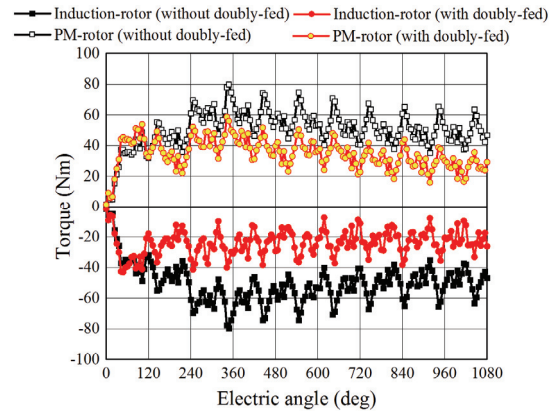
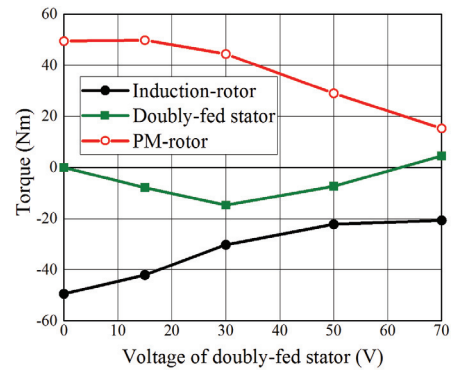


Fig. 6. Preliminary study of magnetic power transmission with resonant inductive coupling under power split mode.

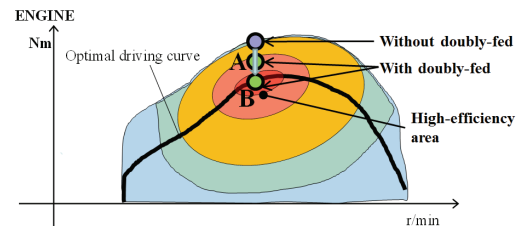
ロータ間で磁的に動力伝達可能か否かの検討を電磁界解析により行う。Fig. 6 に示すように DF ステータと IM ロータ, PM ロータの三要素をモデリングし, パワースプリットモード ($N_{in} > N_{out}$) で二次励磁有無でトルク特性の比較を行う。一例として, IM ロータを 3600 r/min (240 Hz), PM ロータを 2250 r/min (150 Hz), DF ステータの励磁周波数を 15V, 150 Hz に設定したときの電磁界解析結果を Fig. 7(a)に示す。同図より, $s = -0.6$ のすべり s が負で駆動しているため IM ロータは回生トルク, 反作用トルクを受ける PM ロータは力行トルクになっていることが確認できる。Fig. 4(a)より, この駆動条件下では二次励磁による電磁共振結合部は IM ロータが回生トルクになり, DF ステータに電力回生することがわかる。Fig. 7 より二次励磁により IM ロータの回生トルクが減少していることを確認できる。その結果, PM ロータへの反作用トルクも減少し, PM ロータの力行トルクも減少する。このときの動力伝達フローは Fig. 8(a)に示すような動力伝達経路になる。その結果, Fig. 7(b)に示すように二次励磁量を調整することで Fig.7(c),(d)に示すようにエンジンの動



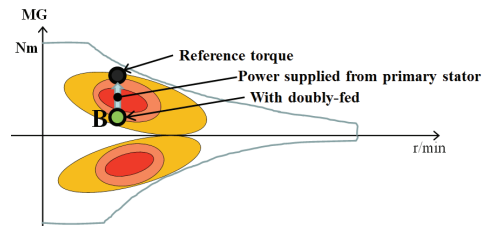
(a) IM-rotor 3600 r/min, PM-rotor 2250 r/min, DF-stator excitation 150 Hz.



(b) Electromagnetic power transmission with respect to doubly-fed magnetomotive force.



(c) Engine torque operating point adjustment with doubly-fed.



(d) Output torque adjustment with power supply from stator.

Fig. 7. Effects of doubly-fed on power-split HEV mode.

作点を高効率点 B で駆動できる。ドライブシャフトに接続されている PM ロータのトルクは上位コントローラからの要求トルクと IM ロータからの反作用トルクを比較して不足分を 1 次側ステータ (Primary stator)の電機子起磁力によって供給して駆動する。一方, Fig. 7(b)より二次励磁の起磁力が増加しすぎると IM ロータの突極ティースが磁気飽和し, 非磁性体の板を介してアキシアルギャップ磁束がラジアルギャップ面に鎖交して磁気干渉してしまい, DF ステータへの回生電力の低下, さらに IM ロータの回生トルク低下および反作用トルクを受ける PM ロータの力行トルクも低

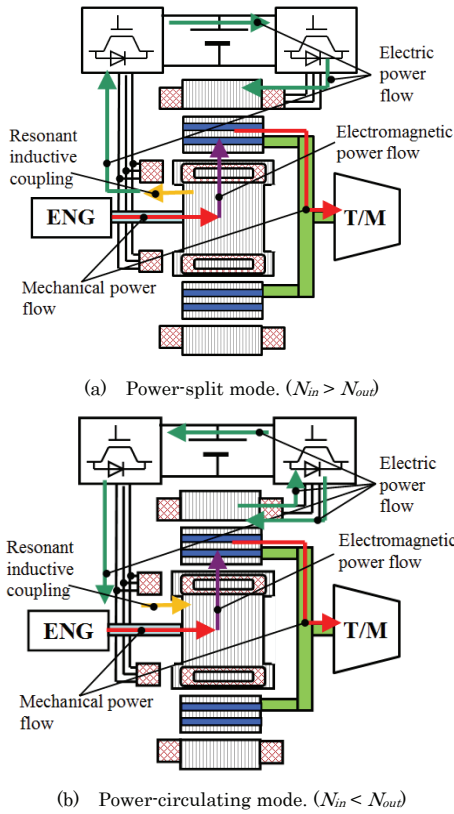
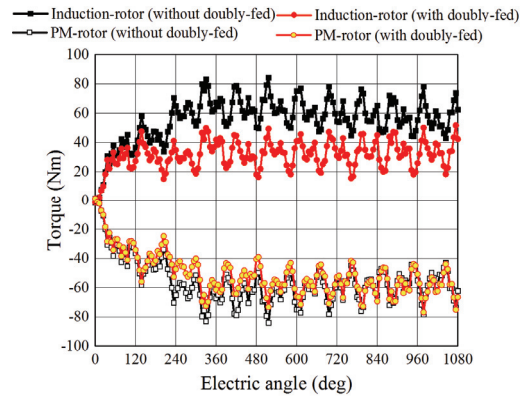


Fig. 8. Magnetic power transmission mode.

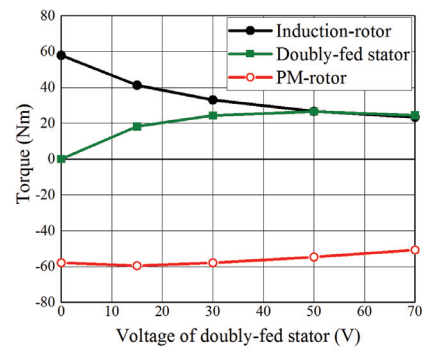
下する。

次に、Fig. 8(b)のパワーサーキュレーションモード ($N_{in} < N_{out}$) にて二次励磁有無でトルク特性の比較を行う。一例として、IM ロータを 800 r/min (53.3 Hz), PM ロータを 2250 r/min (150 Hz), DF ステータの励磁周波数を 15V, 150 Hz に設定したときの電磁界解析結果を Fig. 9(a)に示す。パワースプリットモードの場合と同様に考えると、二次励磁により IM ロータ巻線に非接触給電されるすべり周波数分の電力 (力行) と IM ロータが PM ロータの作り出す回転磁界に対して滑ることで誘導される動力 (力行) の合算 (Fig. 9(c)の動作点 B) が反作用トルクとして PM ロータに作用し、Fig. 8(b)に示すように PM ロータは2つのエネルギーフローから回生トルクを得る。ドライブシャフトへ力行トルクを伝達するためには 1 次側ステータから力行トルクになる電流位相で電機子起磁力にて励磁すれば良い。

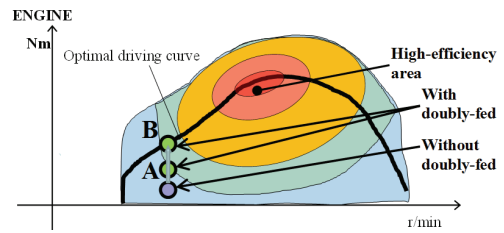
上記の 1 次側ステータの電機子起磁力と電流位相によって、回生トルクで駆動している PM ロータのトルク調整ができるか否かの検討を電磁解析にて検討する。基礎検討モデル (Fig. 10) を用いて電機子起磁力 900 A_{rms}T で励磁し、電流位相を変化させたときのトルク特性を Fig. 11 に示す。同図(a)は 1 次側ステータと PM ロータ間の電流位相-トルク特性を把握するために、二次励磁せず IM ロータの回転速度は PM ロータと同じ回転速度 (2250 r/min) ですべり $s=0$ の条件で解析した。同図(b)は Fig. 9(a)の駆動条件 (IM ロータ 800 r/min, PM ロータ 2250 r/min, DF ステータ 15V, 150 Hz) で駆動しているときに 1 次側ステータは電機子起磁力 900



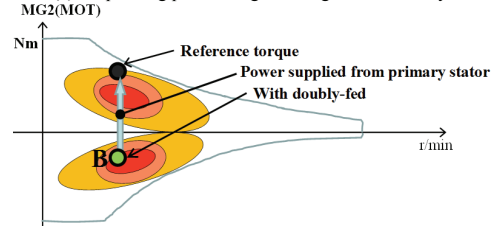
(a) IM-rotor 800 r/min, PM-rotor 2250 r/min, DF-stator excitation 150 Hz.



(b) Electromagnetic power transmission with respect to doubly-fed magnetomotive force.



(c) Operating point changes of Engine with doubly-fed.



(d) Operating point changes with power split HEV mode.

Fig. 9. Effects of doubly-fed on power-circulating HEV mode.

A_{rms}T で励磁したときの特性である。同図より、電機子起磁力と電流位相によってドライブシャフトへの動力伝達を制御することができる。よって、各起磁力バランスを調整することで Fig. 8(b)に示すように回生電力を受けながら差分の電力で 1 次側ステータから PM ロータを力行駆動できると言える。

4. まとめ

本稿では、HEV 用磁気動力伝達機構への応用を目的に、永久磁石ロータと巻線形誘導ロータを備えた二重ロータ式

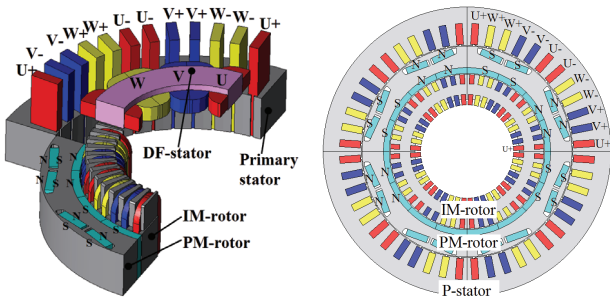
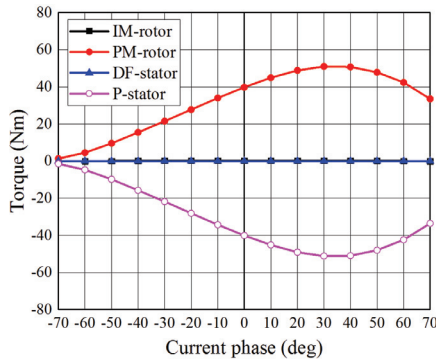
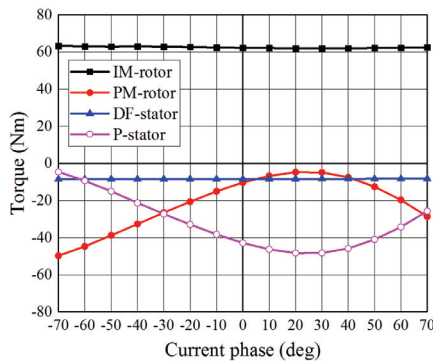


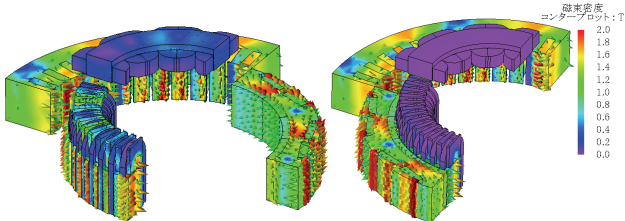
Fig. 10. Proposed electromagnetic coupling dual-axis motor.



(a) Current phase-vs.-torque characteristics.
(IM-rotor and PM-rotor 2250 r/min, without doubly-fed).



(b) Current phase-vs.-torque characteristics.
(IM-rotor 800 r/min, PM-rotor 2250 r/min, with doubly-fed).



(c) Magnetic flux vectors.

(Left: with doubly-fed, Right: without doubly-fed).

Fig. 11. Power transmission adjustment with primary-stator magnetomotive force.

動力伝達機構へのブラシレス二次励磁技術の基礎検討を行った。電磁解析により、トロイダル巻かれた巻線形誘導ロータにアキシアル方向から電磁共振結合でブラシレス二次励磁できることを確認した。また二次励磁することで電磁的に動力分割できることを確認した。今後は HEV システムの各動作モードにおける最適な磁気的動力分割の検討とそれを実現する電磁結合モータの磁気回路設計、及び実機検証を進める予定である。

- (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 Waltscheff 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) Y. Motohashi, T. Noguchi, and M. Aoyama: "Experimental Verification and Vector Control of Magnetic-Modulated Motor", *IEEJ Technical Meeting*, MAG-16-158, MD-16-098, LD-16-112 (2016) (in Japanese).
- (15) 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-16-0663, RM-16-049, VT-16-018 (2016) (in Japanese).
- (16) 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).
- (17) C. Stancu, T. Ward, K. Rahman, R. Dawsey, and P. Savagian: "Separately Excited Synchronous Motor with Rotary Transformer for Hybrid Vehicle Application", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 5844-5851 (2014).
- (18) D. C. Ludois, J. K. Reed, and K. Hanson: "Capacitive Power Transfer for Rotor Field Current in Synchronous Machines", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4638-4645 (2012).
- (19) Y. Fujimoto: "Basic Analysis of Wireless Power Transfer and Electro-mechanical Energy Conversion Using Resonant Inductive Coupling", *IEEJ Industry Applications Society Conference (JIASC)*, No. 1-38, pp. 195-198 (2015).
- (20) Y. Sugawara, and K. Sakai: "Basic Study on Electromagnetic Resonance Motor", *IEEJ Industry Applications Society Conference (JIASC)*, No. 3-18, pp. 139-142 (2015).