

小型高効率主駆動用モータの開発

Development of High Power Density and High Efficiency Traction Motor for FCV, EV

瀧澤 一 晃*
Kazuaki TAKIZAWA

伊藤 智 之*
Tomoyuki ITOH

佐藤 博 之*
Hiroyuki SATOH

要 旨

高効率・小型・高出力をねらいとして電動車両用主駆動モータを開発した。

磁石トルクと共にリラクタンストルクを併用しなおかつ磁石量を削減するため、ロータの表面に磁石を露出させ、隣り合う磁石間に磁性体突極を設置し、突極の一部をフックとし磁石の両端を保持するロータ構造を採用した。発生トルクが同等の磁石埋め込み型ロータとの比較では35%の磁石量削減が確認された。

リラクタンストルク併用型モータはロータの磁束変化が大きく、それに起因するロータ渦電流による発熱が顕著に見られる。本モータは磁石の表面を絶縁処理し磁石とロータヨークけい素銅板間の渦電流経路を切断することにより非絶縁仕様に対し最大 1kW の損失を低減した。

本モータは最大トルク 238Nm, 最高出力 60kW, 最高回転数 11 000rpm の試験結果を得た。出力密度は 1.8kW/kg, トルク密度は 7Nm/kg である。同時にモータ・インバータ総合エネルギー変換効率はUDDSモード走行時の駆動平均効率で 93%を達成した。

ABSTRACT

This paper describes the development of a compact, high-efficiency and high-power traction permanent magnet motor utilizing reluctance torque for electric vehicles.

The “Salient SPM” motor has salient between adjoining permanent magnets exposed on the rotor surface. This structure enabled magnet weight reduction by 35% compared with the interior permanent magnet (IPM) motor which generated equivalent torque.

Insulation between magnet and rotor yoke reduced the eddy current loss by up to 1 kW compared with a non-insulated motor.

As a result, maximum torque of 238 Nm and maximum power of 60 kW were obtained with this motor. The motor gave power density of 1.8 kW/kg, and torque density of 7 Nm/kg. At the same time, the overall motor-inverter efficiency reached 93% average drive efficiency when running in UDDS mode.

1. まえがき

今日、自動車の環境負荷低減に対する要望は更なる高まりを見せている。その課題の一つの解決手法として電気自動車や燃料電池自動車の開発・普及は急務である。それらの自動車に搭載される主駆動用モータは、高効率・高出力・軽量であることが求められる。

HONDA は 1997 年に量産電気自動車 EV PLUS のリリースを開始した。搭載された永久磁石モータ MCF11 は独自に開発したものであり出力密度 1kW/kg, トルク密度 6Nm/kg, UDDS(Urban Dynamometer Driving Schedule)モードでの駆動平均効率 90%の性能を得ている。

しかし、今後の電動車両の航続距離の拡大、エネルギー消費量の削減、低コスト化には更なるモータの進化が必要

*栃木研究所

である。

本論文では、新たに開発した主駆動用モータ(以下Gen II モータ)のねらい、特徴について述べると共に、開発中に得られた知見、試作機にて得られた実測性能について明らかにする。

2. 開発のねらい

Gen II モータ開発に際して以下の3点を主要なねらいとした。

- (1)高効率化・小型高出力化の両立
- (2)低コスト化
- (3)静粛性の向上

電力を無駄なく動力に変換することは電気自動車の一充

電走行距離の増大に寄与する。また燃料電池による電力供給を受けた場合でも燃料消費量削減のためには高効率な電気-運動エネルギー変換が求められる。

エネルギーマネジメントシミュレーション⁽¹⁾での解析結果をFig.1に示す。モータ効率1%の向上が車両重量50kgの軽量化と同等の電動車両のエネルギー消費量削減効果を示す。効果的なエネルギー消費量削減のためにはモータ効率の向上が必要である。

一方バッテリーや燃料電池等と共に車載するためにはモータを小型化する必要がある。またモータコスト低減の観点からも材料使用量の削減すなわち小型化が求められる。

Gen II モータでは高効率と小型高出力の高次元での両立を計るべく、MCF11 から更に3%の高効率化と25%の軽量化を同時に達成することを目標とした。

また将来の量産もふまえ、静粛性についても考慮した。

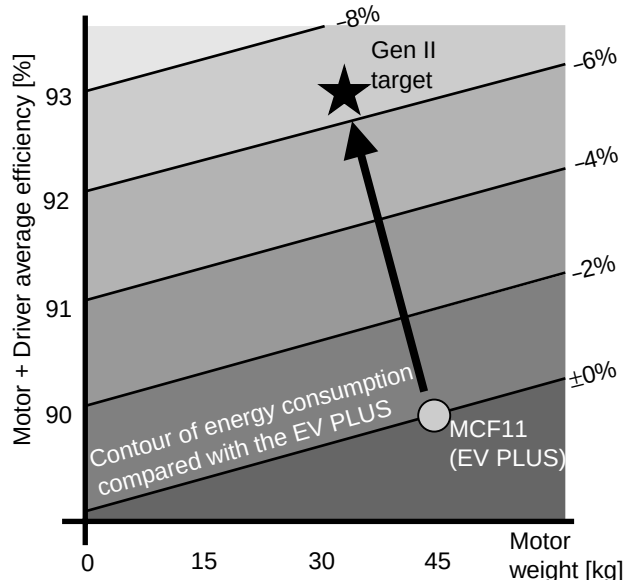


Fig.1 The relation of motor weight and efficiency to vehicle energy consumption at UDDS mode

3. モータの特徴

Gen II モータの概略形状、主要諸元を Fig.2, 3 並びに Table 1 に示す。MCF11 に対しモータ最外径で20%小さく、モータ重量では25%軽量である。

Gen II モータは MCF11 と同様にロータに配された磁石により界磁を生成する永久磁石モータとした。一般的に永久磁石モータは界磁を形成するためのエネルギーの入力が不要であり他形式のモータより高効率である⁽²⁾。加えて前項のねらいを達成するべく以下各項に挙げる技術を新たに適用した。

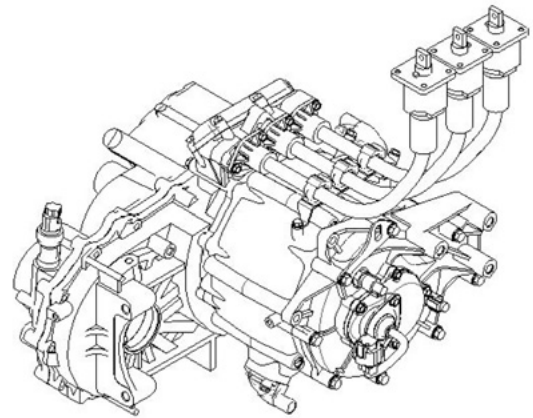


Fig.2 The Gen II motor (with gearbox)

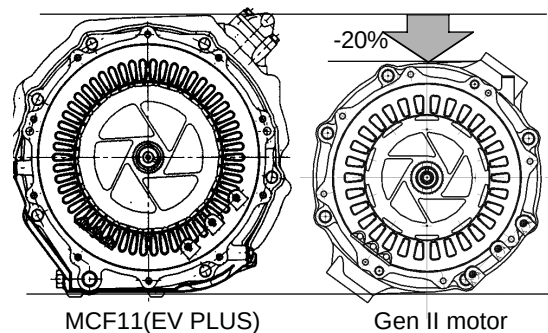


Fig.3 Section of motor

Table 1 Specification of motors

	MCF11(EV PLUS)	Gen II motor
Type	PM synchronous motor	PM synchronous motor
Phase	3	3
Mass	45kg (without gearbox)	34kg (without gearbox)
Pole	18	10
Magnet	Nd-Fe-B (iHc>2.4MA/m)	Nd-Fe-B (iHc>2.8MA/m)
Rotor type	SPM	Salient SPM
Rotor cover	GFRP	None
Cooling system	Water cooled	Water cooled

3.1. 高回転化

駆動用モータを一速固定ギアボックスと組み合わせて車両に搭載する場合、その車両の最大駆動力 T_{max} 、最高速 V_{max} とモータ最大トルク Q_{max} 、最高回転数 N_{max} との関係はギアレシオやタイヤ半径によらず式(1)となる。

$$T_{max} V_{max} = 2 \pi Q_{max} N_{max} \quad (1)$$

最高回転数を高めれば搭載車両の最大駆動力と最高速を犠牲にすることなく、モータサイズおよび重量決定の主要因となる最大トルクを低減できる。

Gen II モータは最高回転数設計値を MCF11 に対し25%高い11 000rpmとした。本設定は高回転化によるギアボッ

クスのフリクションロス増加とのバランスを考慮して決定したものである。

3.2. リラクタンストルクの併用

磁石—ステータ磁極間の吸引・反発力により発生する回転トルク(以下磁石トルク)のみを用いるモータのトルク T_q と誘起電圧 V_a に関する基本式は、磁石による鎖交磁束を ϕ_a 、極対数を P_n 、電気角速度を ω 、機械角速度(回転数)を N 、また d 、 q 軸電流をそれぞれ i_d 、 i_q とおくと

$$T_q = P_n \phi_a i_q \quad (2)$$

$$V_a = \phi_a \omega = P_n \phi_a N \quad (3)$$

と表せる。トルク／電流比はトルク定数 K_t 、誘起電圧／回転数比は誘起電圧定数 K_e でありモータ固有の値となる。また K_t 、 K_e はその単位系を統一した場合

$$K_e = K_t \quad (4)$$

の関係となることが式(2)、(3)からも言える。

この形式のモータは比較的高回転での動作において電源電圧 V_b 以上の誘起電圧 V_a を発生し運転が制限される。MCF11では弱め界磁制御⁽³⁾により等価的に磁石界磁量を抑制することで運転回転数範囲の拡大を行った。但しこの弱め界磁制御はトルク発生には寄与しない成分の電流を通電することとなり効率低下を余儀なくされる。MCF11の弱め界磁に必要な電流の実測値を Fig.4 に示す。

上記を原因として起こる効率低下の抑制は巻線ターン数変更や磁気回路の変更により K_e を下げ弱め界磁電流を低減することで達成されるが、この場合 K_e と同値となる K_t の低下が避けられない。これにより高回転側の損失の低減は計れるものの低回転側では逆に電流が増大することにより損失が増加してしまう。以上の理由により磁石トルクのみを利用したモータでは広範な回転数域の効率向上は困難と言える。

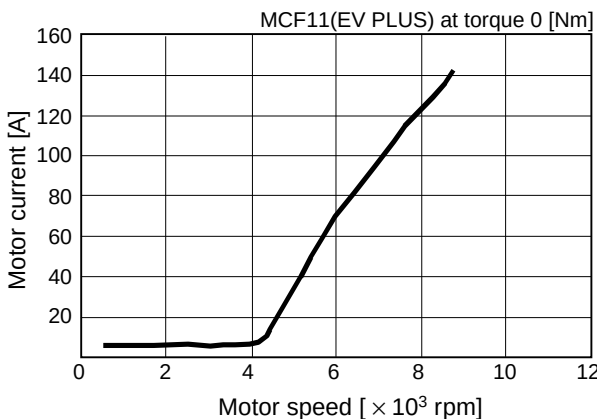


Fig.4 Motor current for flux weakening

そこで Gen II モータは磁石トルクを利用するだけでなく、ロータに突極性を持たせ突極—ステータ磁極間の吸引力により発生する回転トルク、いわゆるリラクタンストルクを併用する形式とした。

磁石トルクのみを利用するモータではトルク／電流比と誘起電圧／回転数比が同値である原則を崩すことは不可能であるが、リラクタンストルクを併用する本形式ではトルク／電流比に対し誘起電圧／回転数比を低く抑えることが可能であり、低回転の効率を犠牲にすることなく弱め界磁制御に依存しない運転回転数範囲を拡大することが可能である。

リラクタンストルク併用機の発生トルク T_q は d 、 q 軸インダクタンスを L_d 、 L_q とおけば

$$T_q = P_n \phi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (5)$$

と表せる⁽⁴⁾。 L_d 、 L_q に差があることがリラクタンストルク発生条件となる。また L_d 、 L_q の差が大きければより多くのリラクタンストルクが発生する。Gen II モータでは巻線ターン数増加などで高インダクタンス化を計りリラクタンストルクを増大させることとした。

また弱め界磁に必要な電流 i_d は式(6)となる。高インダクタンス化は L_d を高めることにより弱め界磁に必要な電流を低減する効果もある。

$$i_d = -\frac{\phi_a}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{V_b^2}{\omega^2} - (L_q i_q)^2} \quad (6)$$

以上の施策の概念図を Fig.5 に示す。

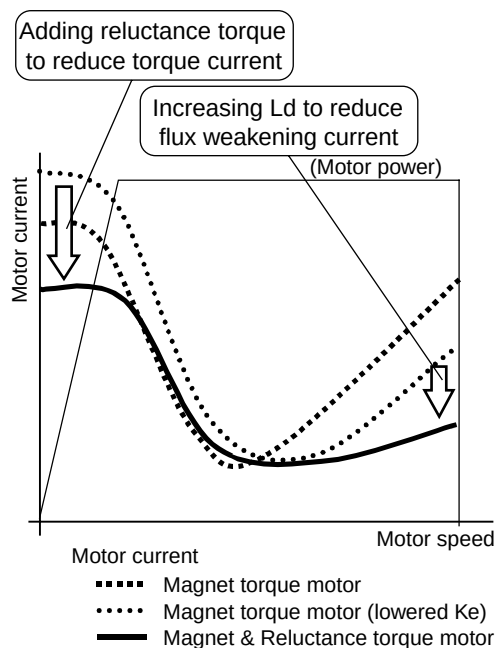


Fig.5 Concept of reducing motor current

3.3. 突極 SPM ロータ

リラクタンストルクの併用を可能とするロータとして様々な形状が検討されている⁽²⁾。特に代表的であるのは磁石をロータヨーク内に埋没させて配置する Interior Permanent Magnet(IPM)形式であるが、ロータが突極性を持っていればリラクタンストルクが発生する基本原理からして、表面に磁石を露出させた Surface Permanent Magnet (SPM)形式でも互いに隣接する磁石間に磁性体突極部を配置する突極 SPM 形式であればリラクタンストルクの発生は可能である。

SPM, IPM, 突極 SPM の各形式の特徴について Table 2 に示す。

IPM 形式はその構造自体が強固に磁石を保持できる形状であるが磁石とステータ間に磁性体が存在するため磁石磁束のロータ内短絡が発生し磁石使用量に対する発生トルクの低下が懸念される。

磁場解析を用いた IPM 形式と突極 SPM 形式のトルク定数/磁石量比比較結果と検討に用いたロータ形状をFig.6 に示す。本解析では突極 SPM ロータの磁石保持部形状は保持のためのフック形状をモデル化していないが、突極 SPM 形式は IPM 形式に対し磁石使用量を 40%以上低減できるとの結果が得られた。

また IPM 形式と突極 SPM 形式のロータを共に試作し実機での比較も実施した。結果を Fig.7 に示す。突極 SPM 形式は IPM 形式の 65%の磁石量で同一トルクを発生できることが確認された。なお実測した突極SPMロータはTable 2 中の構造図にあるような磁石保持フック部を具備している。

以上のことから Gen II モータでは磁石量削減効果が大きい突極 SPM ロータを採用することとした。

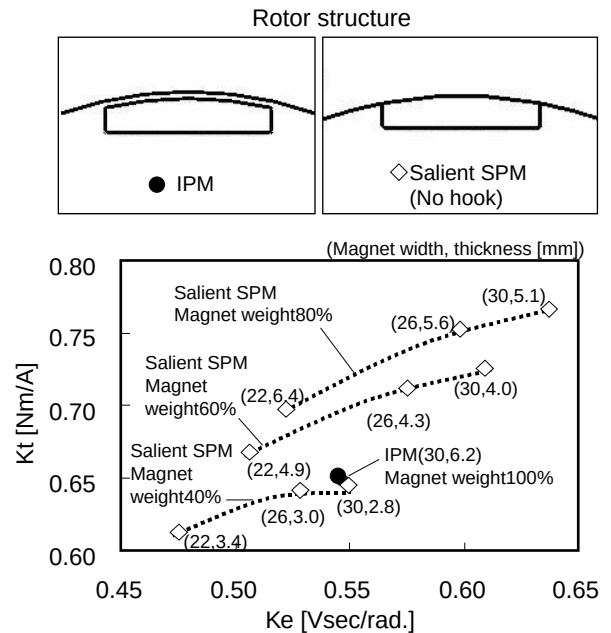


Fig.6 Calculation result of K_t , K_e by rotor structure and magnet shape

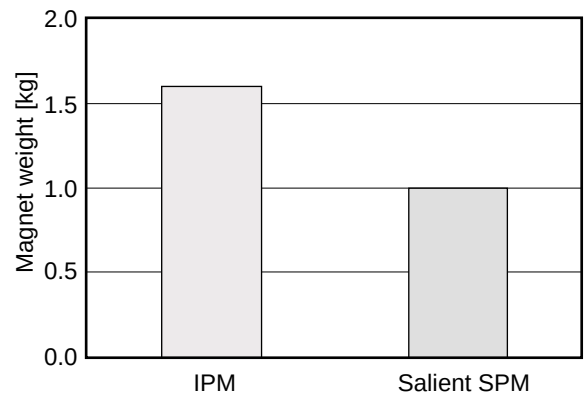


Fig.7 Magnet weight to achieve same motor torque

Table 2 Characteristics due to rotor structure

Type	SPM with non-magnetic cover	IPM	Salient SPM
Application	MCF11 (EV PLUS)		Gen II motor
Structure			
Using reluctance torque	Impossible to use	Possible to use	Possible to use
Magnet torque/Magnet weight	Magnetic air gap	Big air gap	Small air gap
	Short magnet flux	Little	Making short circuit of magnet flux in rotor
Magnet torque/Magnet weight	Not so good	Not so good	Good
Rotor eddy current	Rotor-stator magnetic linkage	Low inductance	High inductance
		Small	Big

3.3.1. ロータ強度

Gen II モータのロータは磁石飛散防止カバーを装備せず、磁石両端部をヨーク突極部から更に突き出したフック部により保持する構成とした。Fig.8に示す非線形構造解析により決定された磁石形状とフック部形状は、実機破壊試験で20 000rpm に耐えうることを確認した。

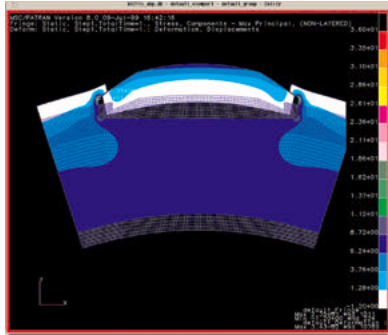


Fig.8 Nonlinear analysis to optimize hook and magnet shape

3.3.2. 不可逆減磁タフネス

磁石量極小化、高インダクタンス化、ロータ表面に磁石を露出させる構造は全て磁石に対する反磁界を増大させる要因となる。強大な反磁界に対して不可逆減磁タフネスを確保するため、Gen II モータでは常温で 2.8MA/m 以上の保磁力を持つ Nd-Fe-B 磁石を採用した。本磁石は Fig.9 に示すように 180°Cにおいても 1.0MA/m 以上の保磁力をもつ。

また磁石保持のためのフック形状が磁石の角部の局部パーミアンスを向上させる効果が磁場解析にて確認された (Fig.10)。

Fig.11 に示すようにこれらの総合効果により Gen II モータは MCF11 同等以上の不可逆減磁タフネスを得ている。

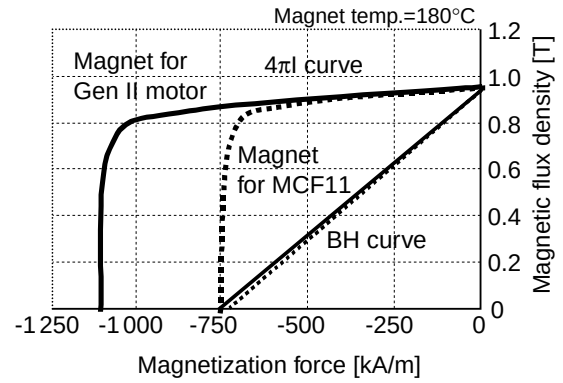


Fig.9 Magnet material property

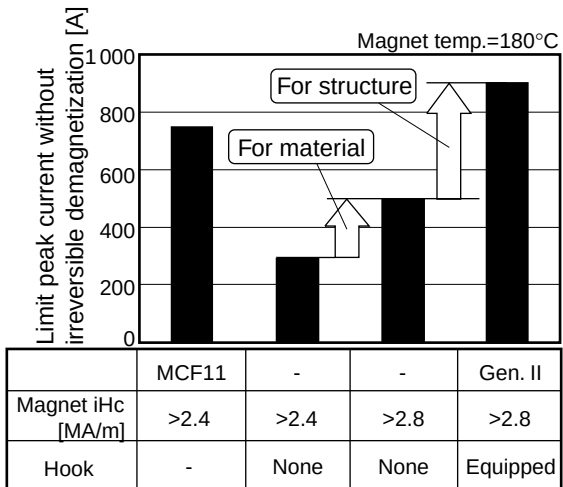


Fig.11 Simulation result of resistance to irreversible demagnetization

3.4. ロータ渦電流損の低減

リラクタンストルク併用機はロータで発生する鉄損が大きい傾向にある。リラクタンストルク併用機は大きなリラクタンストルクを発生させるために、突極部磁性体をステータ近傍に配置し、更にインダクタンスを高く設定する。

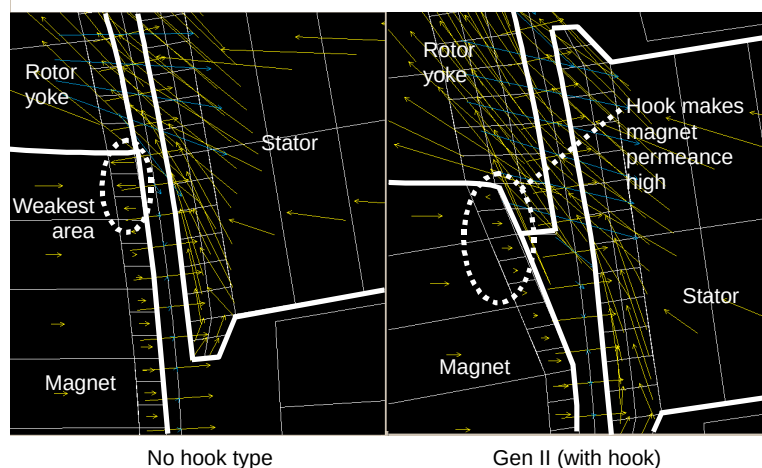


Fig.10 Motor flux density vector at high demagnetizing field condition

そのためステータとロータの磁氣的結合が強く、従来の磁石トルクのみを使用するモータに対しロータ内磁束の変動が大きい。この大きな磁束変化がロータ導体内の渦電流を発生させると考えられる。

Gen II モータでは当初 MCF11 同様の積層けい素鋼板をロータヨークとして採用し発生する渦電流損の低減を目指した。しかしロータの発熱は想定以上に大きいことが判明した。当ロータの温度分布について観測したところ概略 Fig.12 に示す結果を得た。ロータ各部によって温度分布のバラツキがあり、特に磁石と突極部が接触している部位に高い温度が認められた。

この事象は、積層鋼板打ち抜き面と導体である磁石が接触し導通状態となることで磁石・けい素鋼板を共に経由する渦電流導通ループが生成されていたことが原因と考えられる。この概念図を Fig.13 に示す。

このループでの渦電流を抑制するには Fig.14 に示すように磁石とけい素鋼板間の絶縁を保てば良い。そこで磁石に

対し樹脂による絶縁表面処理を施し再度試験を行った。絶縁処理前後でのモータ損失差を Fig.15 に示す。絶縁による損失低減は高回転・大電流通電時に顕著に見られ、最大1kWの効果が確認された。

渦電流損失は磁束変化の大きさおよび周波数に依存し高回転・大電流時に多く発生すると考えられる。本結果にもその傾向が見られることから絶縁によりロータ内渦電流が減少していることが推定される。

3.5. 共振音の抑制

EV PLUS では車速にして 80km/h 付近、モータ回転数にして約 5 000rpm にモータ音が顕著に現れる特性があった。詳細を解析したところ Fig.17 に見られるように明らかに共振と思われる音のピークが存在した。

この共振音の要因について固有値解析、周波数応答解析、実物でのハンマリングテスト等を用いて検討したところステータ円筒の膨張収縮変形のモードでの共振であることが

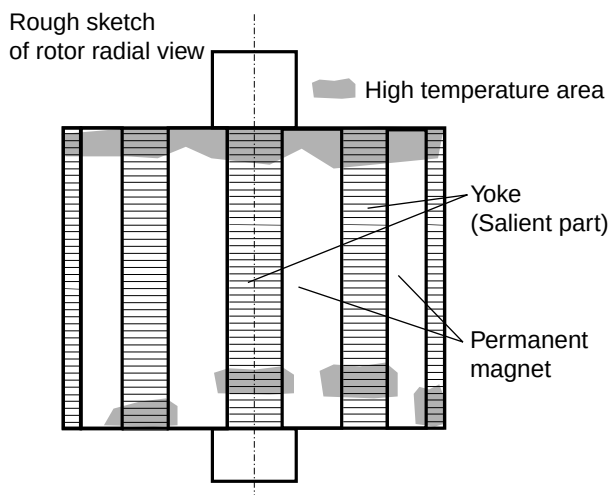


Fig.12 Rotor surface temperature distribution

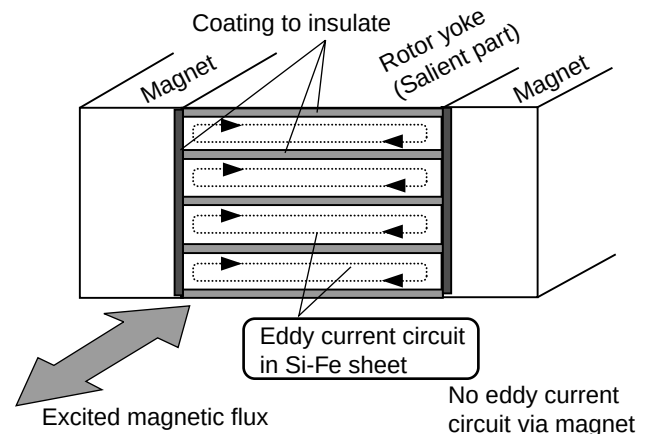


Fig.14 Eddy current behavior with insulation between magnets and Si-Fe sheets

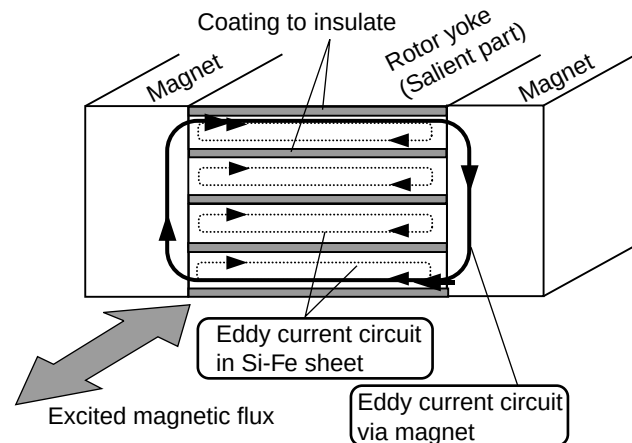


Fig.13 Eddy current behavior without insulation between magnets and Si-Fe sheets

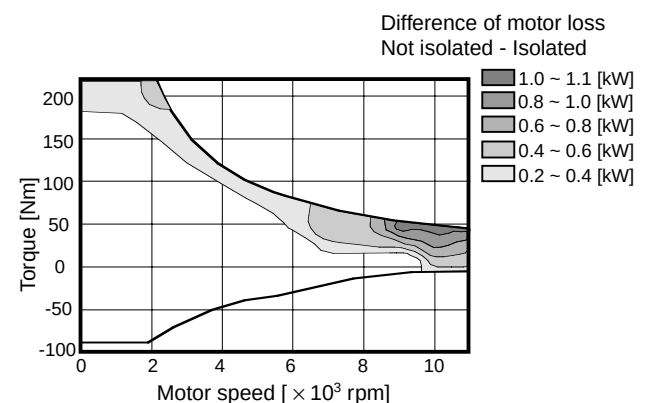


Fig.15 Effect of insulation between magnets and Si-Fe sheets

特定された。円筒形状での膨張収縮モードは円筒を軸方向に切断展開した平板の伸びモードと同様の数式で表現できるためその共振周波数 f_r はステータヤング率を E 、リターンパスの高さ、幅、周長をそれぞれ Trp 、 Wrp 、 Lrp 、ステータ重量を Mst とおくと

$$f_r = \sqrt{\frac{E Trp Wrp}{Lrp Mst}} \quad (7)$$

と表せる。

3相電流により発生するロータ・ステータ吸引反発力が加振力となり、その基本加振周波数 f_e は

$$f_e = 6N Pa \quad (8)$$

であり f_e と f_r が合致する回転数 Nr にて共振音が顕著に発生する。

$$Nr = \frac{1}{6Pn} \sqrt{\frac{E Trp Wrp}{Lrp Mst}} \quad (9)$$

共振回転数を実使用回転数外へ移動させることは式(9)右辺にあるパラメータを変更することで可能であるが、大きく共振回転数を移動させるには特に極対数の変更が効果的である。

Gen II モータでは極対数を5極対とし常用最高回転数11 000rpmを越えた11 600rpm付近で共振が発生する設定とした。

4. モータの性能

Gen II モータ試作機の実測性能を Table 3 にまとめる。

Table 3 Motor performance

	MCF11 (EV PLUS)	Gen II motor
Max power [kW]	49	60
Max torque [Nm]	275	238
Max speed [rpm]	8 750	11 000
Max torque × Max speed [k Nm rpm]	2 406	2 618
UDDS ave. efficiency [%]	90	93
Resonant speed [rpm]	4 800	11 600

4.1. 出力

Gen II モータは最大トルク 238Nm、最高出力 60kW、最高回転数11 000rpmの試験結果を得た。出力密度は1.8kW/kg、トルク密度は 7Nm/kg である。

最大トルクと最高回転数を乗じた数値で MCF11 を上回っており、式(1)から搭載する車両最高速あるいは最大駆動力を MCF11 搭載時より向上させることが可能である。

4.2. 効率

モータと駆動用インバータの効率測定結果を Fig.16 に示す。MCF11 に比較して Gen II モータは高効率化が広範な回転数で達成されている。

UDDSモードでの駆動時平均効率は93%であり、MCF11の90%に対して3%の高効率化を達成した。これはモード中のパワープラント損失が30%削減されたことに相当する。

4.3. 騒音

Gen II モータの実車搭載状態での緩加速時の近接音測定

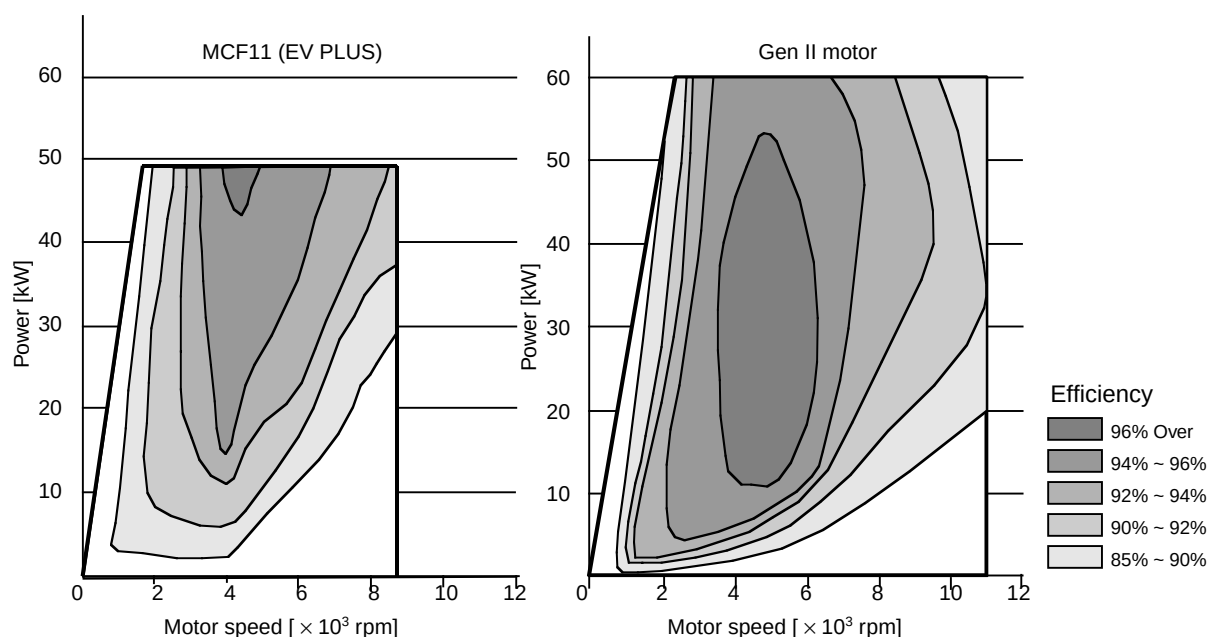


Fig.16 Motor efficiency and power performance (Inverter efficiency included)

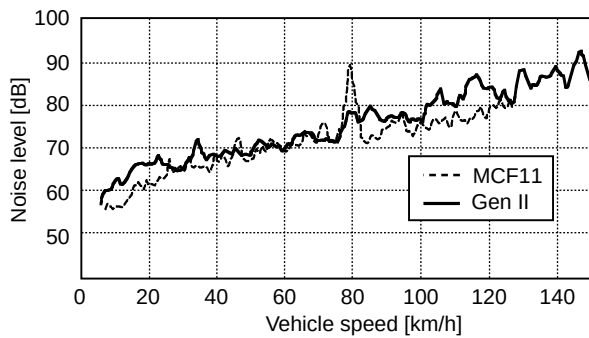


Fig.17 Acoustic noise of vehicle

結果を Fig.17 に示す。MCF11 で発生した共振によるピーク騒音は実使用速度範囲で発生しないことを確認した。MCF11では樹脂製の遮音カバーをステータハウジング外周に装着していたが、Gen II モータでは遮音カバー無しで本結果を達成した。

またモータ外郭部の振動加速度測定においてほぼ設計値である 11 600rpm での共振の発生も確認した。

5. まとめ

将来の電気自動車・燃料電池自動車用の主駆動用モータを新たに開発した。リラクタンストルクを併用することにより運転領域と高効率範囲を拡大し、UDDS 平均駆動効率 93%を達成した。また小型高出力化も同時に達成し特にトルク密度は 7Nm/kg を得た。

同時に本研究を通じて以下の知見が得られた。

- (1) 突極 SPM ロータ形状は IPM ロータ形状に対して磁石量低減効果大きい。
- (2) ロータにけい素鋼板を採用すると共に磁石-けい素鋼板間の絶縁を施すことによりロータの渦電流による損失の低減が可能である。
- (3) 円管膨張収縮モードによる共振発生回転数を予測し、モータ基本骨格の設定により共振を抑制することが可能である。

謝 辞

本研究にあたり、御協力を頂きました社内外の関係者の方々に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 山本恵一, 坪重光, 瀧澤一見, 斉藤祐司: EV PLUS 用主駆動モータの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.10, p.24-31 (1998)
- (2) 制御用アクチュエータの駆動システム調査専門委員

会: 制御用電磁アクチュエータの駆動システム, 電気学会技術報告第 614 号(1996)

- (3) T. Miura, Y. Kawabata, E. Yamada: Development of Motor for Electric Vehicles, EVS-13 Conference Proceeding II, p.57-63 (1996)
- (4) 森本茂雄, 上野智広, 武田洋次: 埋込磁石構造PMモータの広範囲可変速制御, 電気学会産業応用部門誌, 第 114 巻 6 号, p.668-673 (1994)

■ 著 者 ■



瀧澤 一見



伊藤 智之



佐藤 博之