

燃料電池車用主駆動モータの開発

Development of Traction Motor for Fuel Cell Vehicle

坏 重 光*

Shigemitsu AKUTSU

宮 村 智 也*

Tomoya MIYAMURA

佐 藤 博 之*

Hiroyuki SATOH

篠 木 弘 明*

Hiroaki SHINOKI

要 旨

世界初の市販燃料電池自動車「FCX」の主駆動用モータとして DC ブラシレスモータを開発した。

動力性能の向上を目標にリラクタンストルクを併用しながら磁石使用量を最小限とするために突極型 SPM ロータを適用した。インダクタンス値の設定を最高回転時の出力を得ることができる限界値として、弱め界磁電流の抑制にも最大限の効果を得ることで高出力と高効率を両立させた。さらに磁石は表面絶縁と分割配置を組合せて渦電流による発熱を抑制し、かつ高保磁力材料を採用して不可逆減磁の限界を高め、最高速度での連続運転を可能にした。ぜい性材である磁石の強度評価手法にワイブル理論を適用し、劣化も含めた評価を行なうことで、高回転ロータでの強度信頼性保証を達成可能にした。

以上の手法を用いることで、本モータは、最高出力60kW、最大トルク 272Nm、最高回転数 11 000rpm、連続定格出力範囲はトルク200Nm以下の領域を確保できた。また、モータ・インバータ総合効率は LA4 モード走行駆動時の平均で 93%を達成した。

ABSTRACT

A DC brushless motor has been developed as the traction motor for the FCX, the world's first commercially marketed fuel cell electric vehicle.

This motor is adopted a salient pole type surface permanent magnet (SPM) rotor, which enables both to produce reluctance torque and to minimize the use of magnets, for improving dynamic performance. The inductance value is set at the limit value of enabling output at the maximum rotor speed, which suppresses field-weakening current. The motor, therefore, achieves both high output and high efficiency. The utilization of the magnets enables continuous operation at the maximum rotor speed by suppressing eddy current loss by means of magnet surface insulation and magnet segmentation, and by raising the limit of irreversible demagnetization by means of high coercive force of the magnet material. Strength reliability at high rotor speed in consideration of degradation has been assured by applying the Weibull theory as a method of evaluating the strength of magnets which was formed of brittle material.

The employment of the methods described above has resulted in a maximum output of 60kW, a maximum torque of 272Nm, a maximum speed of 11,000rpm, and a continuous rated torque of 200Nm. In addition, the combined efficiency of the motor and inverter achieves 93% in average of LA4 mode.

1. まえがき

今日、地球規模の環境意識の高まりから、自動車の低エミッション化と温暖化に対する CO₂ 低減がさらに求められている。その究極の解決策の一つとして燃料電池車の開発が急務となっている。

2002 年 12 月、Honda は世界に先駆けて燃料電池車を市販した。燃料電池は従来のバッテリーに対し電源出力を大幅に増大することが可能であることから、燃料電池自動車

では電気自動車に対し、商品性向上のために高い動力性能を目指した。そこで、燃料電池車の主駆動モータでは、1997 年に販売された電気自動車 EV PLUS の主駆動モータ(以降、MCF11)⁽¹⁾に対し大幅な出力向上と高回転化を図ることとした。

この燃料電池車用モータは、すでに試作を進めていた小型高効率主駆動モータ技術⁽²⁾をベースに、1.6ton を超える車両骨格に適合した性能諸元を目標値として設定し開発を進めた。

*栃木研究所

本論文では、燃料電池車「FCX」の主駆動モータ(以降、MCF21)の開発にあたって適用した技術、得られた性能について述べる。

2. 開発のねらいと目標性能

MCF21型モータ開発に際して以下の二項目の両立を主要なねらいとした。

(1) 効率向上

(2) 出力向上と連続出力範囲の拡大

駆動効率は、LA4 モード駆動平均において MCF11 の 90 % を上回る値を得ることを目標とし、以下の出力性能と両立させるものとした。出力目標値は、車両動力性能の要求値などから下記のように設定した。

最大駆動力 F_{max} 、最高速度 V_{max} とモータ最大トルク T_{max} 、モータ最高回転数 N_{max} との関係は(1)式で表わされる⁽²⁾。

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

車両目標値である 150km/h の最高速度と加速に要求される最大駆動力に対し、2軸平行式ギヤボックスでの減速比の成立範囲、フリクション増加などのバランスを考慮してモータ最高回転数 N_{max} を 11 000rpm と設定し、それによりモータ最大トルク T_{max} は 272Nm とした。

また、登坂発進に必要な最小駆動力から、0 rpm 時のモータ最低トルク値(ボトム値)は 262Nm 以上と設定した。同時に 0 rpm 駆動時の最大相電流値がインバータの許容電流を超えないように、双方を両立できる高いトルク定数を設定した。

モータ最高出力は、加速性能要求値と燃料電池出力から 60kW に設定した。さらに、最高速度で連続走行できることという要求と、登坂時にアクセル操作のみでの停止が成立するための必要トルク条件から、トルク 180Nm 以下の全出力領域を連続出力可能範囲にすることを目標にして、損失低減と冷却性向上を図った。

一方電源電圧については、燃料電池の劣化による電圧降下を考慮し、モータの最高出力を保証する最低電圧を 260V とした。この電圧下で、高トルク定数と最高回転での要求出力確保という相反する特性の両立を図った。

3. 適用技術

MCF21 の主要諸元を Table 1 に、減速機を含んだ概略外観形状を Fig. 1 に示す。

大きな駆動トルクに対してトルクステアを無くすドライブシャフトの等長化を実現するために、右側シャフトをハーフシャフト構造として、そのサポートを右側モータハウジングに取り付けた。この構造により、モータ本体の後方位置から大径のドライブシャフトインボード部分を外側に

Table 1 Comparison of Motor Specifications

		MCF11 (EV PLUS)	MCF21 (FCX)
Type		PM synchronous motor	PM synchronous motor
Phase		3	3
Pole		18	12
Rotor	Type	SPM	Salient SPM
	Cover	GFRP	None
Magnet	Material	Nd-Fe-B	Nd-Fe-B
	iHc	> 2 388kA/m	> 2 785kA/m
Cooling system		Water cooled	Water cooled

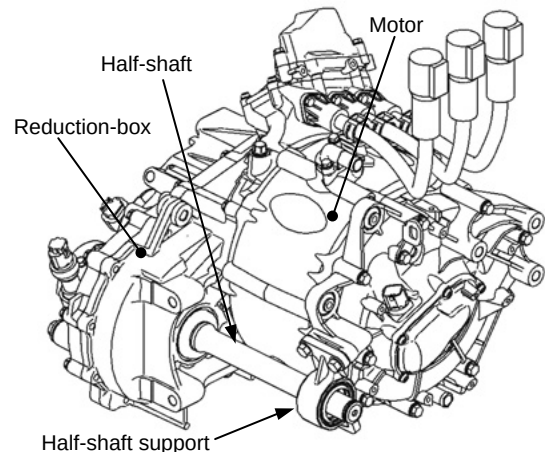


Fig. 1 Appearance of MCF21

移動できたことで一速固定減速機の軸間距離の短縮が可能となった。5 % のモータ外径縮小と合わせ、ディファレンシャル軸センターからモータ最前部までの長さを MCF11 に対し 52mm 短縮して搭載空間の縮小に寄与した。

3.1. モータの基本構成

全運転領域での高効率化を実現するため、すでに先行開発により得られていた知見⁽²⁾から、基本形式としてはリラクタンストルク併用型 PM (Permanent Magnet) モータ形式を選択した。同様に高コストの磁石の使用量を少なくするために、ロータ形式には突極型 SPM (Surface Permanent Magnet) 型を採用した⁽²⁾。突極型 SPM ロータの磁石部断面基本構造を Fig. 2 に示す。

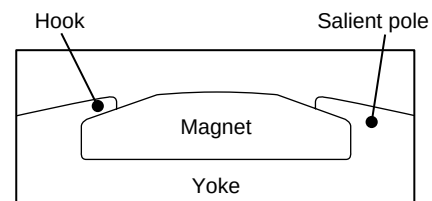


Fig. 2 Rotor structure of salient SPM

3.2. リラクタンストルク併用型 PM モータ

DC ブラシレスモータでは、リラクタンストルク併用機

の発生トルク T_q は、磁石による鎖交磁束を ϕ_a 、極対数を P_n 、d・q 軸電流をそれぞれ i_d ・ i_q 、d・q 軸インダクタンスをそれぞれ L_d ・ L_q とおけば(2)式のように表わせる⁽³⁾。

$$T_q = P_n \phi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2)$$

L_d ・ L_q に差があることがリラクタンストルク発生の条件となり、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。

また、弱め界磁に必要な電流 i_d は、電気角速度を ω 、電源電圧を V_b とすれば(3)式となる。

$$i_d = -\frac{\phi_a}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{V_b^2}{\omega^2} - (L_q i_q)^2} \quad (3)$$

L_d を高める高インダクタンス化は、弱め界磁に必要な電流を低減させる効果がある⁽²⁾。

逆に、高インダクタンス化は電圧限界での最大出力を低下させる。突極性を考慮した場合の最大出力を、Fig. 3でのd 軸上で近似的に求めると、式(4)で表わされる。

$$P = V_{b \max} \frac{\phi_a}{L_d} \quad (4)$$

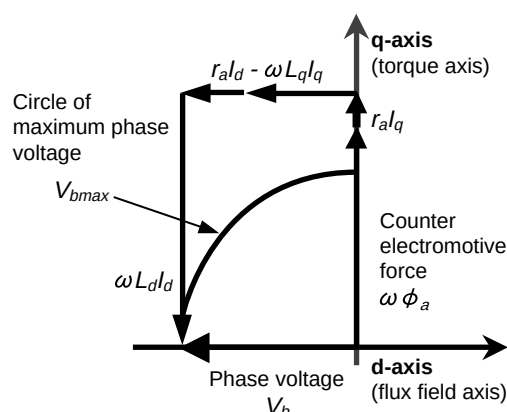


Fig. 3 Vector diagram of operating point at maximum power

とくに、最高回転数での出力は車両の最高速度確保に直接に寄与する。MCF21では、これらの相反する要求に対し、インダクタンス L_d を最高回転数での目標出力を確保できる限界値設定(最大値)として、弱め界磁に要する電流を最小限となるようにした。さらに、磁気回路シミュレーションによって、その条件下で L_d ・ L_q の差を最大限確保できる形状を設計し、Fig. 4の実測結果に示すようにリラクタンストルク成分を磁石トルクに対し 38%増となるまで確保した。

両者の合成トルクを最大限活用するためには0 rpmを含めた全回転域で精度良く適切な電流進角量を与える必要があるため、フルデジタルベクトル制御を適用した。また、磁極検出には、回転停止時でも位置検出が可能なVR(Variable Reluctance)型レゾルバを採用した。

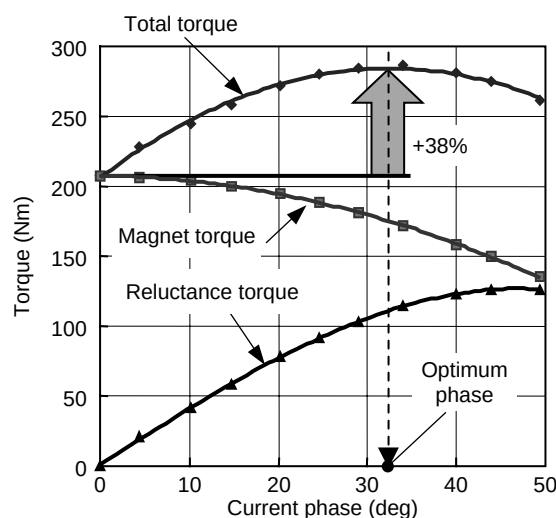


Fig. 4 Torque characteristic and current phase

3.3. 高回転化対応技術

最高回転数 11 000rpm 時の出力は、式(4)によれば、インダクタンス L_d の大きさで制限を受けると同時に磁石による鎖交磁束 ϕ_a に比例することとなる。磁石による鎖交磁束は、磁石自体の温度による磁束密度変化によって運転中に変動する。Nd-Fe-B磁石は温度が上がれば磁束密度が低下する特性を持っているため、高回転での渦電流の増加による温度上昇に伴って鎖交磁束 ϕ_a が低下し、式(4)にしたがって最高出力も低下する。

MCF21では、高インダクタンス下での電圧限界に設定した最高回転時の目標出力を磁石温度抑制と不可逆減磁限界の向上で安定確保した。また、ぜい性材である磁石の強度保証手法を確立することで高回転ロータの強度信頼性を確保した。

3.3.1. 磁石温度抑制による電圧限界出力の確保

定格電圧下での最高出力はインダクタンス値により決定され、Fig. 5の計算値に示すように磁石温度上昇に伴う鎖交磁束の減少にしたがって低下する。この図によって、最高速度の確保に必要なモータ出力値と磁石の温度特性から磁石の許容温度の上限値が得られる。

磁石温度をこの上限値以下に抑えることで目標の出力値を確保することができた。実測で得られた磁石温度上昇に伴う出力推移を、Fig. 5に示す。磁石温度は、上限温度以下で平衡に至り目標出力で平衡することが確認された。実測と計算との差は、磁石の温度が測定位置と全体の分布に差異があるためと推定される。

磁石温度抑制手法としては、磁石に絶縁表面処理を施すことでヨーク突極部に発生する渦電流による発熱を減らせることがわかっている⁽²⁾。MCF21ではさらに磁石内部の渦電流による発熱で磁石温度が顕著に上昇することがわかったため、絶縁表面処理と合わせ磁石を軸方向に分割配置することで渦電流の発生を抑制した。

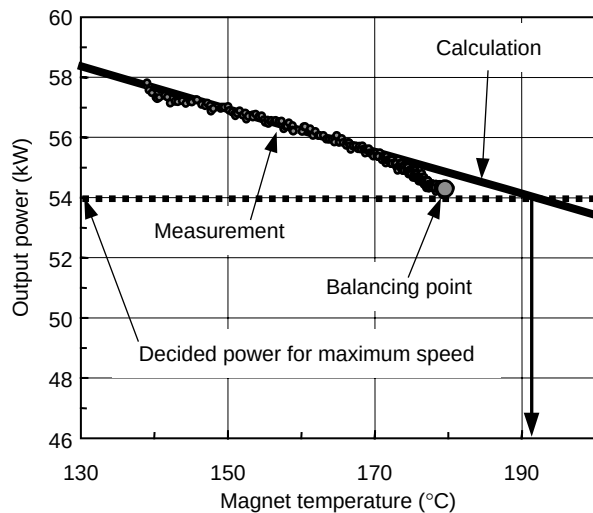


Fig. 5 Output at maximum speed

また、磁石防錆(ぼうせい)目的の金属メッキはその固有抵抗値が磁石素材の値に比べて約 $1/20 \sim 1/80$ と低いため、メッキ層に発生する渦電流による発熱が無視できない量となり磁石温度を引き上げることも判明した。Fig. 6に示すように、メッキ無しと同等温度にするためには磁石分割数を30%以上増やす必要があるということが確認できたため、磁石分割数を増やすことなく、金属メッキのかわりに絶縁表面処理のみで磁石の防錆効果を確保した。

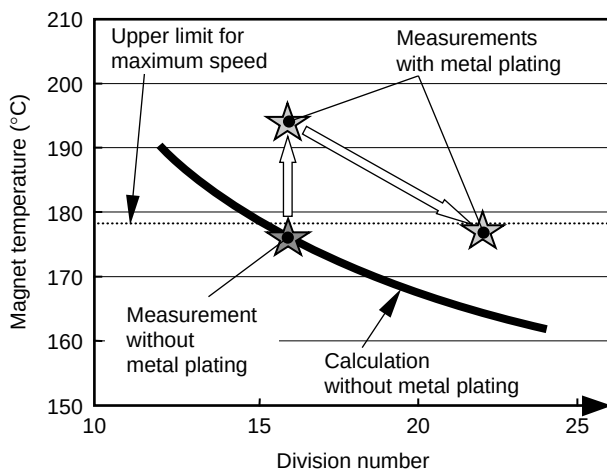


Fig. 6 Magnet temperature by division number

3.3.2. 不可逆減磁タフネスの確保

高インダクタンス、表面磁石型ロータというモータ構造は磁石に対する反磁界を増大させる構成であり、また逆に磁石保持のためのフック部構造は磁石の不可逆減磁タフネスを向上させることはすでに確認されている⁽²⁾。

MCF21では、前記の磁石温度の抑制手法と合わせ、200°Cにおいて756kA/m以上の保磁力を持つ高保磁力のNd-Fe-B磁石を採用することで、Fig. 7に示すように、運転範囲内での磁石温度および電流値では不可逆減磁が発生しない設定とした。図中に計算結果と実測での確認点を示す。

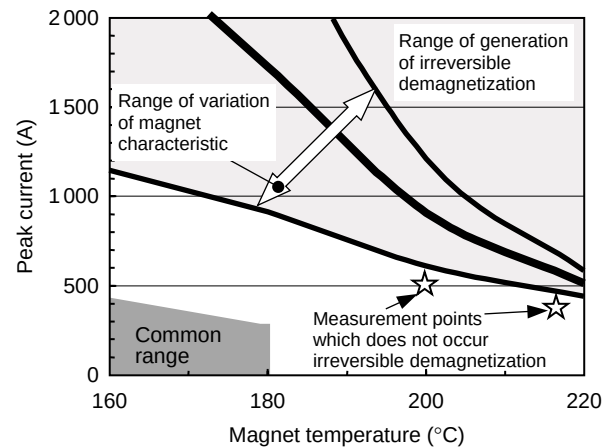


Fig. 7 Results of simulation of resistance to irreversible demagnetization

3.3.3. ロータ強度保証

MCF21の突極型SPMロータはFig. 2に示すように、磁石の遠心力負荷を磁石本体の強度と磁石保持のためにヨークの突極部から出したフック部によって受ける構造として、非線形構造解析での磁石およびヨーク部応力分布の計算結果をFig. 8に示す。

解析によって得られたヨークのフック部形状は、実機での破壊試験で17500rpm以上の破壊強度を持つことを確認した。

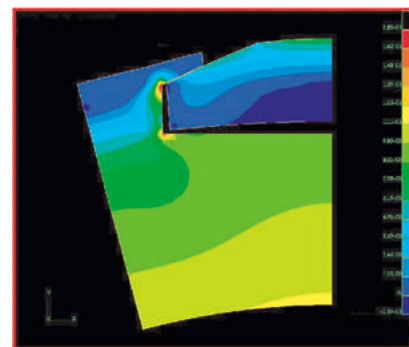


Fig. 8 Nonlinear analysis of salient SPM Rotor

一方、Nd-Fe-B磁石の強度特性については、ぜい性破壊材料であるため通常の強度設計では信頼性保証ができない。これに対して、最弱リンク説を用いて磁石破壊の挙動を説明することで、破壊確率がワイブル分布に従い強度特性にワイブル理論を適用することが可能であるという知見が得られている⁽⁴⁾。

MCF21ではこの知見を利用し、目標信頼性値(破壊確率)に対し、実体形状での破壊試験から得られた磁石強度特性に劣化による強度の低下も考慮したうえで、最大発生応力に対し十分な安全率を確保する設計とした。これらの概念をFig. 9に示す。本手法によって、磁石飛散カバーを持たない表面磁石型ロータの強度保証が可能となり、磁石磁束の活用率を高め、磁石使用量の削減に寄与する実機適用技術を確立して高回転ロータの強度信頼性を確保することができた。

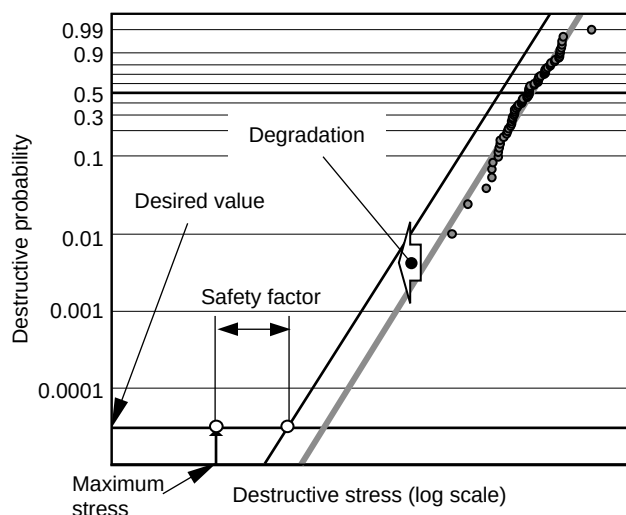


Fig. 9 Weibull plot for magnet strength

3.4. ロータスキューの適用

0 rpm 時において最大相電流値を抑制しつつ最低トルクを持ち上げることを目的に、磁束波形の整形などと合わせロータ磁石のスキュー配置を適用した。スキュー手法は、ロータ全体を軸方向に二分割し各々回転方向前後に角度を持たせる方式とし、スキュー無の仕様と同等レベルの組立作業性を確保した。

スキュー角度は、Fig. 10に示すように平均トルクの低下が最小限となるよう最小角度で最大効果を出すベーストルク波形とスキュー角度との組合せを見出した。最低トルク同一条件での最大相電流値は、最終的に14%の低減効果を得ることができた。

同時に高圧系部品保護に有利になるように最高回転時における誘導起電力(最高電圧)の低減も図っている。スキューによる誘導起電力の平均電圧低下は2%であるのに対し、ピーク電圧値では9%の低減効果を得ることができた。

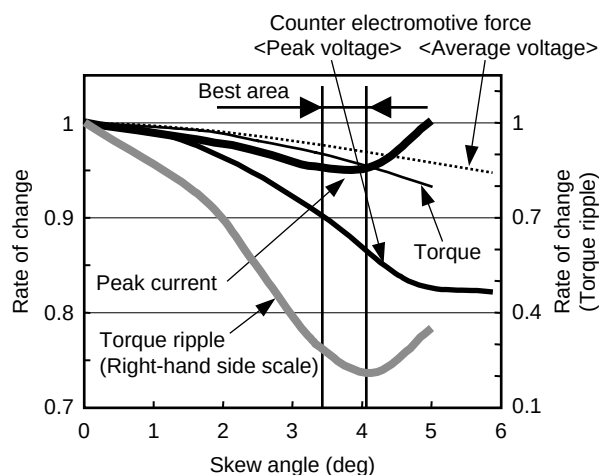


Fig. 10 Characteristic of torque, current and electromotive force by rotor skew angle (calculation)

3.5. ステータ冷却技術

連続出力範囲を高出力側に広く確保するために、銅損の低減と共にステータの熱抵抗低減を図った。巻線からステータ外周のウォータジャケットに至る熱流経路では、熱抵抗は巻線とステータの接触部面積にほぼ支配されていることを測定で確認した。実測結果を Fig. 11 に示す。これをもとに巻線の量とスロット数・形状のバランスを取ることで、相抵抗値(損失)削減と巻線-ステータ間の接触面積拡大を両立させ、目標の冷却性を達成した。

これにより、トルク 200Nm 時と弱め界磁電流が最大となる最高回転時の双方の電流値での連続通電においても、巻線温度を許容値内で平衡させることができた。

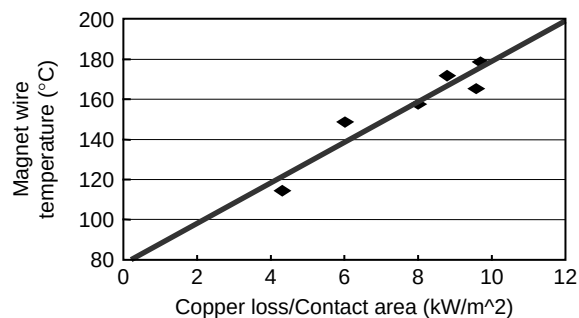


Fig. 11 Heat resistance

3.6. モータ制御

前記のように、モータ制御にはフルデジタルベクトル制御を採用している。高回転領域においては実効電圧を増やすためPWM(Pulse Width Modulation)のスイッチングを行なわない1パルス制御に切り替えて出力を確保した。

制御パラメータは、マップで持つ方式としている。パラメータデータの取得にモータ性能の即時解析システム⁽⁵⁾を活用することで、詳細なマップデータを作成するのに要する時間を従来の1/2に削減し、開発期間の短縮に寄与した。

4. モータの性能

MCF21 の達成性能を Table 2 にまとめる。出力範囲の広さを表わす指標として最大トルク×最高回転数値を用いているが、この値は MCF11 に対し 24%向上している。

Table 2 Motor performance

Type	MCF11 (EV PLUS)	MCF21 (FCX)
Maximum power (kW)	49	60
Maximum torque (Nm)	275	272
Maximum speed (rpm)	8 750	11 000
Max. torque x Max. speed (kNm rpm)	2 406	2 992
LA4 ave. efficiency (%)	90	93
Maximum efficiency (%)	96	97

4.1. 出力

出力アウトラインは、目標通り最高出力 60kW、最大トルク 272Nm、最高回転数 11 000rpm の試験結果を得た。連続定格出力範囲はトルク 200Nm 以下の領域に確保できた。結果を Fig. 12 に示す。これによって得られた燃料電池自動車の駆動力線図を Fig. 13 に示す。

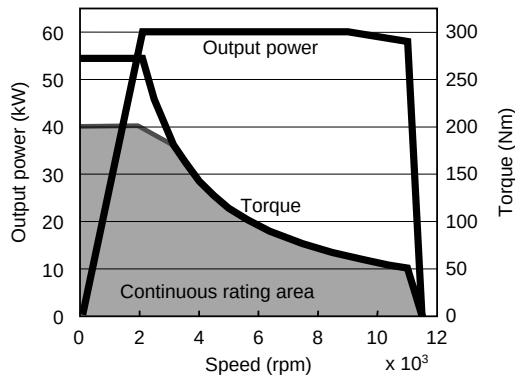


Fig. 12 Motor output performance

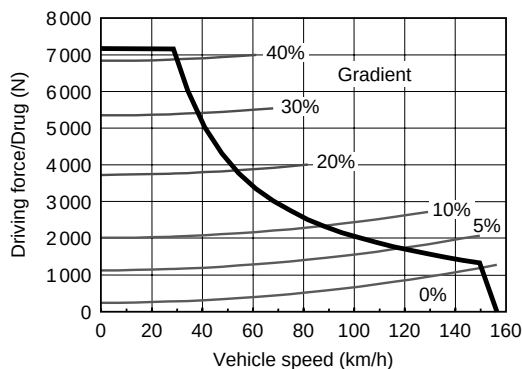


Fig. 13 Driving force curve

4.2. 効率

モータと駆動用インバータの総合効率の測定結果、および LA4 モード走行時の出力履歴を Fig. 14 に示す。

LA4 モードでの駆動時の平均効率は 93%を得、MCF11 の効率 90%に対して損失約 30%低減に相当する 3%の高効率化を達成した。

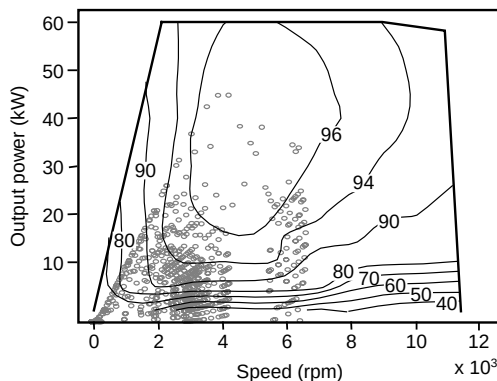


Fig. 14 Motor efficiency (including inverter efficiency) and driving force locus of LA4 mode

5. まとめ

燃料電池自動車用の主駆動用モータを新たに開発し車両に搭載した。

- (1) 電圧限界まで出力を活用することで、高回転化と高トルク定数化との両立を図ることができた。
- (2) 高トルク定数化によって効率中心を低速側に寄せたことから、LA4 モードでの効率向上を実現した。
- (3) ロータスキューにてストール時の最大相電流値を抑制し、インバータを小型化した。
- (4) Nd-Fe-B 磁石強度にワイブル理論を適用して、表面磁石型ロータ仕様の強度信頼性を実証した。

参考文献

- (1) 山本恵一, 坪重光, 瀧澤一見, 斉藤祐司: ホンダ EV PLUS用主駆動モータの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.10, p.24-31 (1998)
- (2) 瀧澤一見, 伊藤智之, 佐藤博之: 小型高効率主駆動モータの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.105-112 (2000)
- (3) 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)
- (4) 柳木孝昭, 喜多見義: Nd系希土類焼結磁石の強度評価手法, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.225-230 (2001)
- (5) 村山芳也, 新博文, 岸田真, 浅見記吉: モータ性能の即時解析システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.107-112 (2001)

■ 著 者 ■



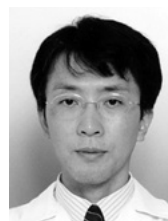
坪 重光



佐 藤 博 之



宮 村 智 也



篠 木 弘 明