

燃料電池車 FCX クラリティ用駆動モータ

Electric Drive Motor for Fuel Cell Vehicle FCX Clarity

福嶋 達也* 岩井 明信*
Tatsuya FUKUSHIMA Akinobu IWAI
山口 憲隆* 篠木 弘明*
Noritaka YAMAGUCHI Hiroaki SHINOKI

要 旨

燃料電池自動車 Honda FCX クラリティの駆動モータとして新たに DC ブラシレスモータを開発した。

車両のパッケージング要求から、駆動モータとギヤボックスを同軸化し、さらにパワードライブユニットも一体化することで駆動ユニットの小型化をおこなった。駆動モータとギヤボックスを一体化することで、フリクションを低減し走行エネルギー効率の向上に貢献した。

また、最高速度向上のための高回転化と、動力性能向上のための高出力化を目的に IPM (Interior Permanent Magnet) ロータを採用した。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、高回転と高出力を両立させた。

以上の手法を用いることで、駆動ユニットは従来モデルに対して前後方向寸法を 162mm 短縮、高さ方向寸法を 240mm 短縮を実現した。駆動モータ性能は、最高出力 100kW、最大トルク 256Nm、最高回転数 12500min⁻¹ を達成した。また、モータの駆動効率最高 97% を達成した。

ABSTRACT

A new DC brushless motor has been developed as the electric drive motor for the Honda FCX Clarity fuel cell vehicle.

Due to the demands of vehicle packaging, a coaxial configuration was employed for the drive motor and gear box, and the power drive unit has been integrated with the drive motor, enabling the size of the overall drive unit to be reduced. The integration of the drive motor and gear box has reduced friction, contributing to increased operating efficiency.

An IPM rotor has been employed to increase motor speed in order to increase maximum vehicle speed, and to increase power output in order to enhance vehicle performance. The use of a limit value for the inductance setting that enables greater power to be achieved at maximum motor speed has reconciled high motor speed with high power.

These innovations have enabled the length of the drive unit to be reduced by 162 mm and its height to be reduced by 240 mm. The electric drive motor achieves a maximum power of 100 kW, maximum torque of 256 Nm, and maximum speed of 12500 min⁻¹. In addition, a maximum motor drive efficiency of 97% has been achieved.

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 低減が求められている。Honda ではこれらの期待に応えるべく、環境対応の究極の自動車として燃料電池自動車 Honda FCX (2003 年モデル FCX) の開発を進め、2002 年に日本政府と米国ロサンゼルス市に世界に先駆けて燃料電池自動車を納車した⁽¹⁾。さらに燃料電池自動車を広く普及させるために、低温での性能を向上させた Honda 製スタックを搭載した New Honda

*四輪開発センター

FCX (2005 年モデル FCX) を開発し、2004 年にニューヨーク州、2005 年に北海道に納車し、世界で初めて氷点下での使用を可能とする燃料電池自動車を実用化した⁽²⁾。

2008 年 7 月、水素と空気を上から下に流す Honda 独創の燃料電池スタック「V Flow FC (Vertical Gas Flow Fuel Cell) スタック」⁽³⁾ 技術を核に、燃料電池自動車だからこそできるショートノーズ、ロングホイールベースによる広々とした室内空間、そして発進から最高速まで続く、力強く、なめらかな加速を実現し、究極のクリーン性能だけでなく、クルマとしての新しい価値と魅力を提案した Honda FCX クラリ

ティ(FCX クラリティ)を発売した。このFCX クラリティの駆動モータ(MCF31)では、2005 年モデル FCX の駆動モータ(MCF21)に対し小型化、高効率化、出力向上、高回転化を図ることとした。

本論文では、MCF31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

MCF31型モータ開発に際して以下の二項目を主要なねらいとした。

(1) 駆動ユニットの小型化と高効率化

(2) 出力向上と高回転化

燃料電池自動車だからこそできるショートノーズデザインと低全高デザインを実現するため、モータ磁気回路の小型化と共に、モータ、ギヤボックス、パワードライブユニットとの一体化を図り、駆動ユニットのコンパクト化を目指した。

また、走行エネルギー効率60%を実現するため、駆動効率は、モータ最高効率において MCF21 と同等の 97%を目標とし、以下の出力性能と両立させるものとした。

出力性能目標値は、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} との関係は式(1)で表される⁽⁴⁾。

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

車両目標値である 100mile/h(160km/h)の最高速度と加速時に要求される最大駆動力に対し、同軸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 12500min⁻¹ と設定し、それによりモータ最大トルク T_{max} は 256Nm 以上と設定した。

また、登坂発進に必要な最小駆動力から、0 min⁻¹時のモータ最低トルク値(ボトム値)を設定した。同時に0 min⁻¹駆動時の相電流値がインバータの許容最大電流を超えないように、トルク定数を高く設定した。

モータ最高出力は、ガソリン車2.4Lクラス同等以上の追い越し加速性能の実現のために 100kW 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、要求連続出力可能範囲を設定し損失低減と冷却能力向上を図った。

一方、モータの最高出力を保証する最低入力電圧は、走行エネルギー効率向上のため昇圧器を設けず燃料電池出力電圧とした。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。

Table 1 Comparison of motor specifications

	MCF21 (2005 model year FCX)	MCF31 (FCX Clarity)
Type	PM synchronous motor	PM synchronous motor
Phase	3	3
Number of poles	12	8
Rotor type	Salient SPM	IPM
Magnet	Nd-Fe-B	Nd-Fe-B
Cooling system	Water-cooled	Water-cooled

3. 適用技術

MCF31 の主要諸元を Table 1 に、モータ、ギヤボックス、パワードライブユニットを一体化した駆動ユニットの概略外形形状を Fig. 1 に示す。

モータの基本形式としては MCF21 同様の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。極数は損失(特に高周波鉄損)および騒音、振動を低減するため8極を選択した。

3.1. 駆動ユニット構造

車両パッケージングのために、以下の構造によって駆動ユニットを小型化した。また、車両の走行エネルギー効率向上のために駆動ユニットの伝達効率の向上を図った。

3.1.1. モータとパワードライブユニットの一体化

車両の全高を低く抑えるため、また衝突時の歩行者保護のために駆動ユニットを一体化し全高を短縮した。

モータとパワードライブユニットを一体化するため、モータの振動低減とパワードライブユニットの耐振動性を向上させた。これにより Fig. 2 に示すように、モータ最下部からの高さを 2005 年モデル FCX に対し 240mm 短縮して搭載空間の縮小に寄与した。

3.1.2. モータとギヤボックスの同軸化

車両のショートノーズデザインと衝突時の乗員保護の両立のため駆動ユニットの全長を短縮した。

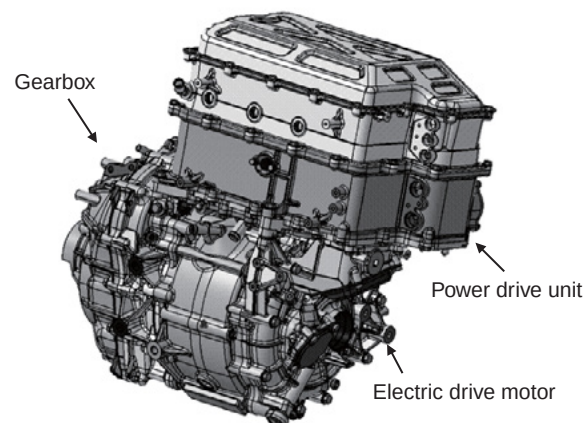


Fig. 1 Appearance of drive unit assembly

モータのロータシャフトを中空構造にし、その中にドライブシャフトを貫通させギヤボックスと同軸化した。このモータならではの画期的な新構造と4%のモータ外径縮小と合わせ、Fig. 3 に示すように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、2005年モデルFCXに対し162mm短縮して搭載空間の縮小に寄与した。

3.1.3. モータ内オイル潤滑

車両の走行エネルギー効率を向上させるため駆動ユニットのフリクション低減による伝達効率の向上を図った。

2005年モデルFCX [Fig. 4 (a)] ではモータとギヤボックスを別室構造とし、ベアリングの潤滑はそれぞれグリスとギヤ油としていた。FCX クラリティ [Fig. 4 (b)] では、モータ内部部品の耐油性を向上させ、モータとギヤボックスを同室構造としてオイルシールを削減し、新開発のギヤ油潤滑ベアリングを採用し2005年モデルFCXに対して最大36%フリクションを低減した (Fig. 5)。

また、モータ内部のギヤ油によりステータ巻線温度が均一化され、高出力化と連続運転領域の拡大を達成した。

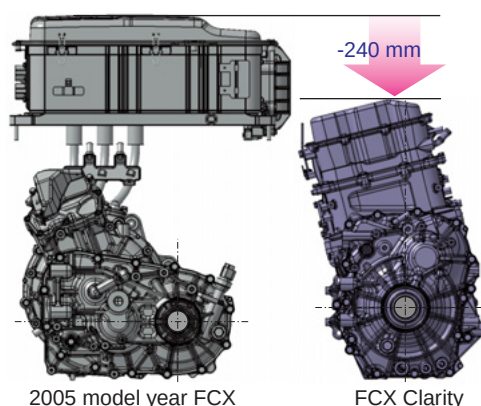


Fig. 2 Comparison of total height of drive unit

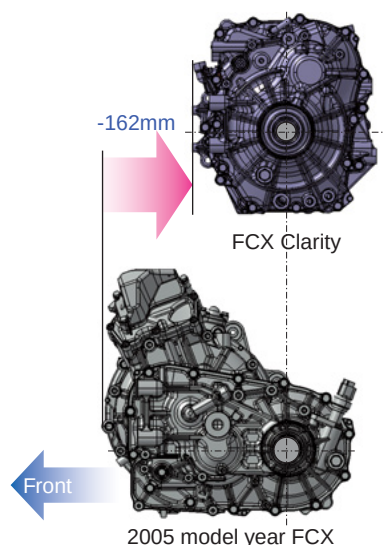


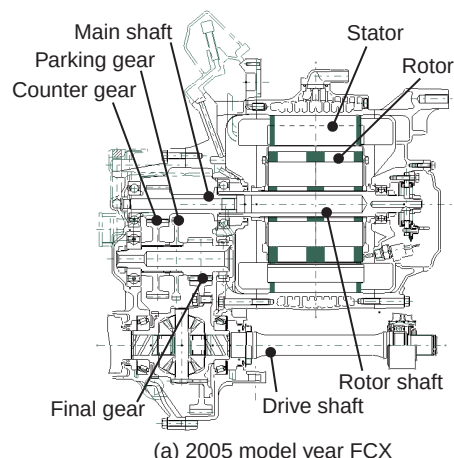
Fig. 3 Comparison of total length of drive unit

3.2. リラクタンストルク併用型 PM モータ

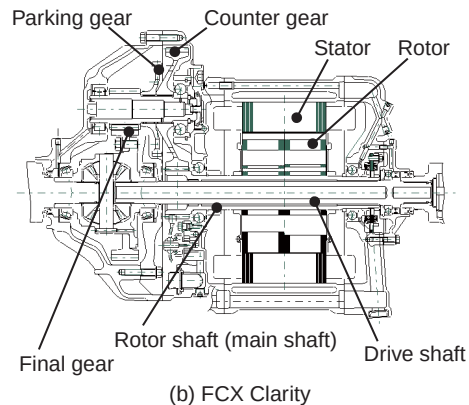
全運転領域での高効率化を実現するため、基本形式としてMCF21 同様のリラクタンストルク併用型 PM モータ形式を選択した。

リラクタンストルク併用型 PM モータでは、Fig. 6 に示すようにロータの磁石により発生する磁石トルクと、磁石と磁石の間にある電磁鋼板突極部により発生するリラクタンストルクを併用することができ、結果として磁石使用量を削減できるという特徴がある。

リラクタンストルク併用型のモータ発生トルク T_q は、トルク軸を q 軸、界磁軸を d 軸とし、磁石による鎖交磁束



(a) 2005 model year FCX



(b) FCX Clarity

Fig. 4 Section of drive unit

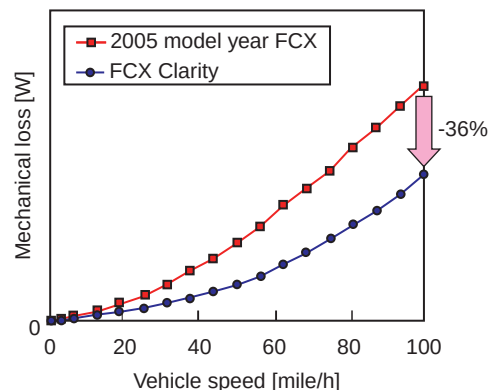


Fig. 5 Comparison of mechanical loss

を ϕa 、極対数を P_n 、 d 軸と q 軸電流をそれぞれ i_d と i_q 、 d 軸と q 軸インダクタンスを L_d と L_q とおけば式 (2) のようになり、右辺第 1 項が磁石トルク、第 2 項がリラクタンストルクを表す⁽⁵⁾。

$$Tq = P_n \cdot \phi a \cdot i_q + P_n(L_d - L_q)i_d \cdot i_q \quad (2)$$

第 2 項よりリラクタンストルクは $(L_d - L_q)$ に比例することがわかる。

また、弱め界磁運転に必要な電流 i_d は、電気角速度を ω 、入力電圧を V_b とすれば式 (3) となる。

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

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

一方で出力 P を近似的に表すと式 (4) となり、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。

$$P \propto \frac{V_b \cdot \phi a}{L_d} \quad (4)$$

3.3. ロータ形状の選定

MCF31 では MCF21 に対し、さらなる高出力化、高回転化、小型化を実現するため、ロータ形式の選定をおこなった。

高出力化、小型化を実現するためには、インダクタンス値の最適化が必要である。入力電圧範囲内で最高回転時の目標出力を確保できる限界値(最大値)に L_d を設定し、さらにこの条件下で $(L_d - L_q)$ を最大限確保するよう L_q を設定する。これにより高回転時の弱め界磁運転に要する電流を最小限化し、リラクタンストルクを有効利用することが可能となり、高出力化、小型化を達成できる。

また、高回転化を実現する上での課題として、ロータヨークの強度確保が挙げられる。最高回転時ロータヨークには

磁石の重量により大きな遠心力が作用する。この遠心力に対して強度を確保する必要がある。

インダクタンス値の最適化、ロータヨークの強度確保を目指し量産実績のある下記 2 形式の PM について磁場解析および強度解析を用いて比較検討をおこなった。

形式 A: MCF21 で採用した突極型 SPM (Surface Permanent Magnet) [Fig. 7 (a)]

形式 B: ACCORD Hybrid⁽⁶⁾ で採用した矩形磁石のセンターリブ IPM [Fig. 7 (b)]

形式 A は、磁石をステータコアに近づける配置が可能のため、 d 軸上の磁気抵抗を高められることから L_d を低く設定できる。かつ $(L_d - L_q)$ を大きく設定することができるため、高出力化に対して利点を有する。磁場解析の結果、ねらいどおりの目標トルク、出力が達成されることが確認できた。

しかし、MCF31 では高回転化に加え、MCF21 に比べて極数を減らしたことにより 1 極あたりの磁石量を増加させる必要があり、最高回転時ロータヨークには大きな遠心力が作用する。強度解析の結果、磁石を保持するヨークフック部に応力が集中し高回転時に強度が確保できないことがわかった。

形式 B は、センターリブを設けることで磁石を 2 分割し、センターリブ部とヨーク付け根部に遠心力負荷を分担させることにより、過度な応力発生を抑制することが可能である。強度解析の結果、応力を最適に分担することにより最高回転数まで強度を確保できた。

その反面 d 軸の磁気抵抗が低減されるため、 L_d が高くなり、磁場解析の結果、高回転時において目標出力に到達できないことがわかった。

以上の結果より、形式 A の高出力化に対する利点と形式 B の高回転化に対する利点の融合をねらって、形式 C の検討をおこなった。

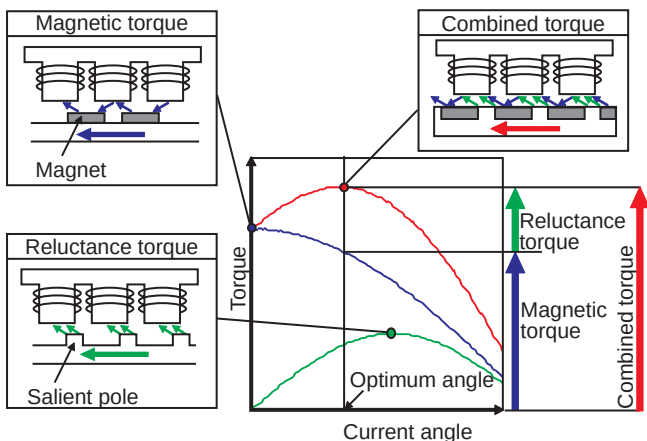


Fig. 6 Conceptual diagram of torque characteristic and current angle

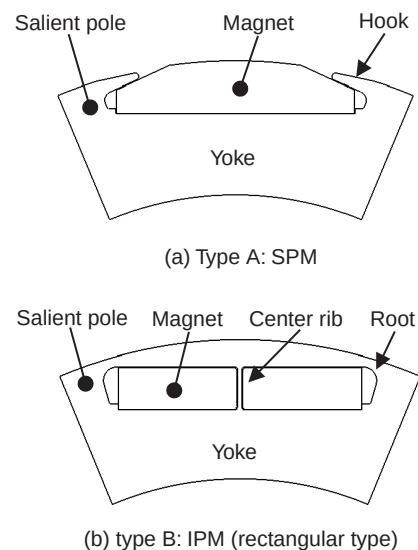


Fig. 7 Structure of rotor

形式Cは L_d を低く設定するため半月型形状の磁石を採用し、強度を成立させるためセンターリブIPM構造を採用した。磁場解析および強度解析の結果、形式Cはねらいどおりに高出力化と高回転化を両立することが確認できた(Fig. 8)ため、MCF31のロータ形式は半月型磁石形状のセンターリブIPMを選択した(Fig. 9)。非線形構造解析によるロータ回転中の磁石およびロータヨーク部の応力分布の計算結果を Fig. 10 に示す。

半月型磁石形状のセンターリブIPMにおいて詳細な検討を進めたところ、新たな課題として寸法許容範囲でのばらつき、ヨークスロット内での組付け位置ばらつきにより、高回転時にヨークに発生する応力が大きく変化することがわかった。これは、従来にない独自形状の半月形磁石をIPMとして採用したことにより、磁石とヨークスロットの接触位置が安定しないことによるものである。そこで、寸法許容差と組付け位置のいかなる組合せにおいても磁石とヨークスロットの接触位置が安定するよう磁石形状とヨークス

ロット形状を最適化した。この結果、実機での破壊試験で 23000min^{-1} 以上の破壊強度を持つことを確認した。

3.4. 磁石発熱対策と表面処理

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つため、高回転での渦電流の増加による温度上昇に伴い鎖交磁束が低下し、式(4)にしたがって最高出力も低下する⁽⁷⁾。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。

ロータ内の磁束変化により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。MCF31では渦電流低減のため、磁石軸方向の分割と磁石表面に樹脂塗装を施した。その結果、発熱を抑制し磁石温度を上限温度以下に抑えることが可能となり目標の出力値を達成した。

また、駆動ユニットの小型化のためにMCF31はモータとギヤボックスを一体化したため、プライマリシャフトおよびドライブシャフトのベアリングを潤滑するためのギヤ

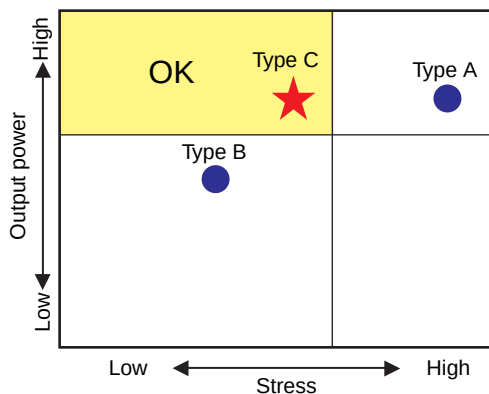


Fig. 8 Conceptual diagram of output power and stress and current angle

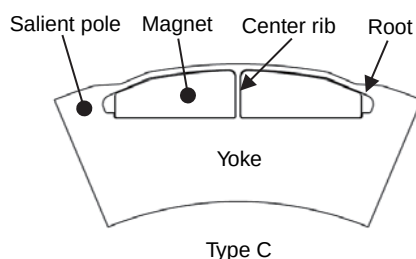


Fig. 9 Structure of IPM rotor (half moon type)

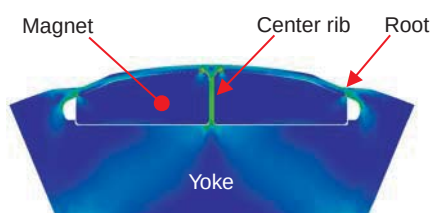


Fig. 10 Nonlinear analysis of IPM rotor (half moon type)

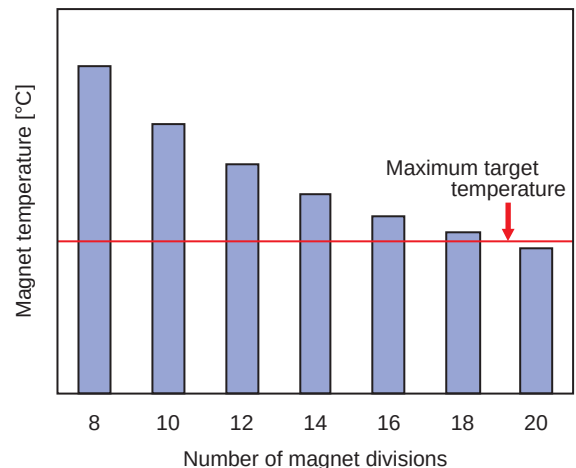


Fig. 11 Relation between number of magnet divisions and temperature

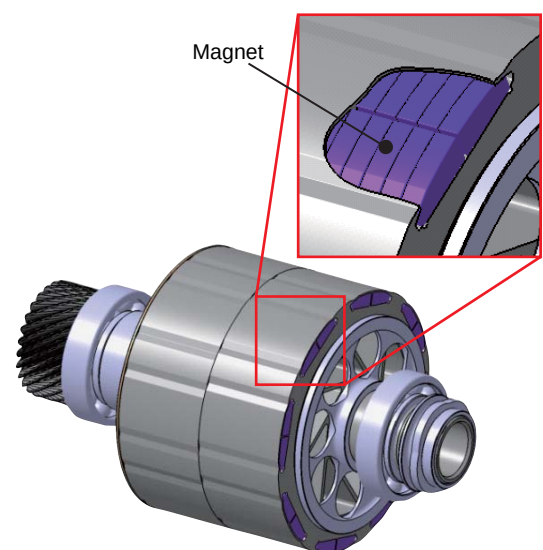


Fig. 12 Part of magnet division structure in rotor

油がモータ内部に存在している。そのため、MCF31の磁石表面処理には渦電流低減の絶縁性と防錆効果に加えて耐油性が求められたため、磁石表面に耐油性に優れた無機系の表面改質処理を施し、その上に絶縁表面処理を施すことで対応した。Fig. 11 に磁石分割数と目標温度との関係、Fig. 12 にロータ内の磁石分割配置の一部を示す。

3.5. ステータ冷却技術

登坂から最高速に至る広範囲の連続運転領域を確保するために、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ージャケットに至る熱流経路の熱抵抗は、巻線とステータの接触部面積にほぼ支配されることは知られている⁽⁷⁾。MCF31では、モータの損失を低減するために極数を MCF21 の 12 極に対して 8 極へ減らした。そのため巻線とステータの接触部面積が低下し熱抵抗が増加し冷却能力が不足したため、極数 n に対するスロット数の比率を MCF21 の $3n$ から $6n$ に変更する (Fig. 13) ことで、相抵抗値(損失)削減と巻線-ステータ間の接触面積の拡大を両立させ、目標の冷却能力を達成した。

これにより、冷却困難な運転条件である登坂時と最高回転時の連続通電において、巻線温度を各部耐熱温度の許容値内にコントロールすることができた。

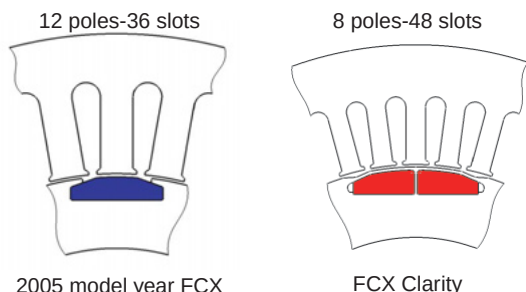


Fig. 13 Ratio of slots and poles

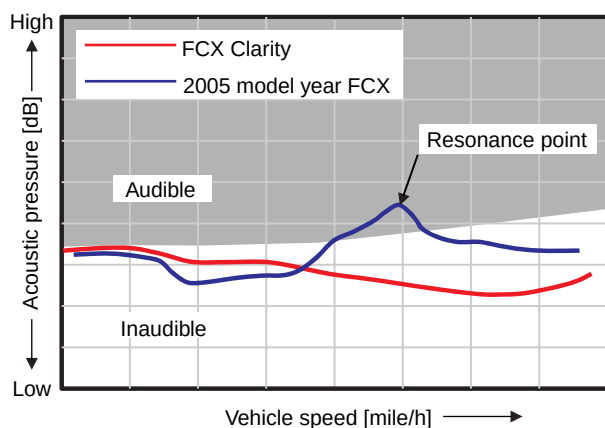


Fig. 14 Noise and vibration performance

Table 2 Motor performance

Type	MCF21 (2005 model year FCX)	MCF31 (FCX Clarity)
Maximum power [kW]	80	100
Maximum torque [Nm]	272	256
Maximum speed [min^{-1}]	11000	12500
Maximum efficiency [%]	97	97

3.6. モータ静粛性

内燃機関のピストン往復運動による振動や燃焼音が発生することもない、モータドライブならではの静けさを最高速度まで実現するためにモータの静粛性を追求した。

MCF31 では、極数を MCF21 の 12 極から 8 極に減らすことで、使用回転領域から共振点を排除した (Fig. 14)。これにより静粛性と高出力化を両立した。

4. モータの性能

MCF31 の達成性能を Table 2 にまとめる。モータの最高効率も MCF21 と同性能を達成し、トルク密度は 15% 以上、出力密度は 20% 以上向上し、重量は 20% 以上低減した。

4.1. 出力

出力アウトラインは、目標どおり最高出力 100kW、最大トルク 256Nm、最高回転数 12500 min^{-1} の試験結果を得た。結果を Fig. 15 に示す。最高出力 100kW の発生領域を約 30mile/h の中間速度域から約 80mile/h の高速度域まで可能とすることで、Fig. 16 に示すようにガソリン車 2.4L クラス同等以上の発進加速と追い越し加速を達成した。

また、連続定格出力範囲はすぐれた冷却能力により、登坂-市街地-最高速度に至る広範囲を満足している。

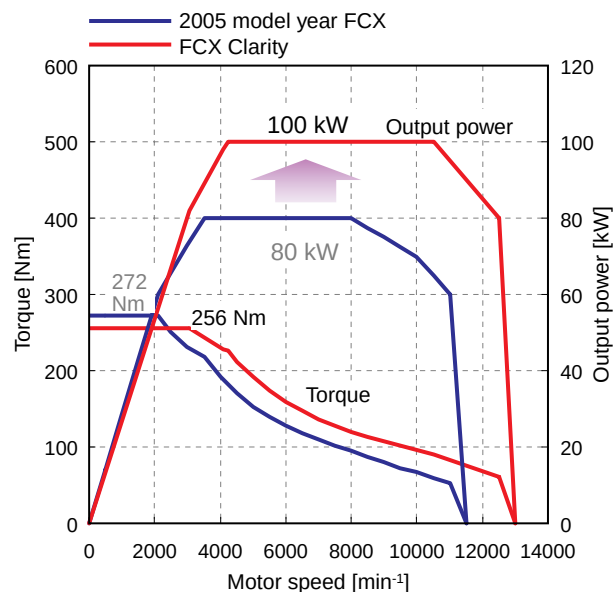


Fig. 15 Motor output performance

4.2. 走行エネルギー効率

モータ駆動時の最高効率97%の達成、駆動ユニットのフリクションロス36%の削減により、駆動ユニットの高効率化を図ることができた。

エネルギーマネジメントの最適化とあわせて、走行エネルギー効率は Fig. 17 に示すように 2005 年モデル FCX と比較し、約 10%向上し、目標値の 60%を達成した。

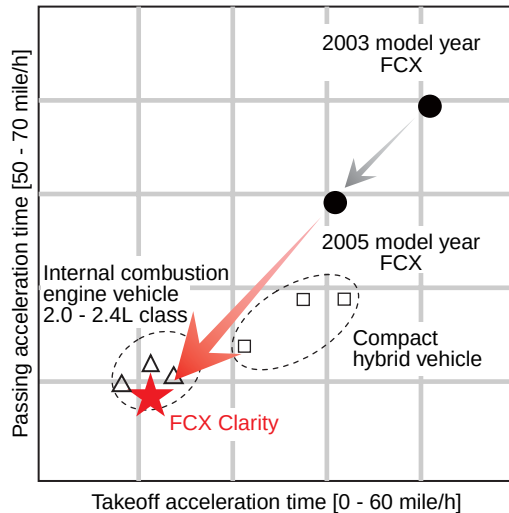


Fig. 16 Acceleration performance

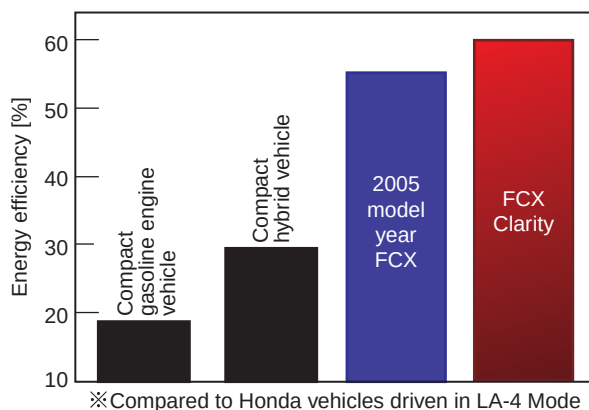


Fig. 17 Energy efficiency, LA-4 Mode

5. まとめ

FCXクラリティ用の駆動モータを新たに開発し、車両に搭載した。本開発により、下記の結果が得られた。

- (1) モータ、ギヤボックス、パワードライブユニットの一体化により、駆動ユニットを小型化し、車両のショートノーズデザインと低全高デザインを具現化した。
- (2) モータの高効率化と駆動ユニットのフリクション低減による伝達効率向上により、走行エネルギー効率60%達成に貢献した。
- (3) モータの低インダクタンス化により 100kW の高出力

を高回転領域まで維持可能になり、車両の動力性能向上を実現した。

- (4) ロータヨークの強度を向上させ高回転化を可能にしたことで、車両の最高速度向上を実現した。

参考文献

- (1) 川崎聡志, 小椋正己, 小野徹, 加美陽三: 世界初の燃料電池乗用車 Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.1-6
- (2) 川崎聡志, 内堀憲治, 村上義一, 清水潔, 藤本幸人: 次世代燃料電池スタックを搭載した New Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.45-50
- (3) 斉藤信広, 菊池英明, 中尾靖宏: FCX クラリティ搭載の新燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.15-22
- (4) 瀧澤一見, 伊藤智之, 佐藤博之: 小型高効率主駆動用モータの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.105-112
- (5) 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)
- (6) 貝塚正明, 今井利隆, 石川享, 仁木学, 安達浩光: ACCORD Hybrid システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.1, p.18-24
- (7) 坪重光, 佐藤博之, 宮村智也, 篠木弘明: 燃料電池車用主駆動モータの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.73-78

■ 著 者 ■



福嶋 達也



岩井 明信



山口 憲隆



篠木 弘明