

ビジネス向け電動二輪車「EV-neo」用駆動モータの開発

Development of Electric Motor for “EV-neo”, Electric Motorcycle for Business Use

小林 直樹*

Naoki KOBAYASHI

要 旨

ビジネス向け電動二輪車 EV-neo の駆動用モータとして排気量 50 cm³ のエンジンスクータと同等の動力性能を持つ DC ブラシレスモータを新たに開発した。減速ギヤを併用することにより要求最大トルクを低減させ、モータを小型化し、さらに PDU (Power Drive Unit) と一体化することで、ホイールサイドに搭載可能な駆動ユニットを実現した。減速ギヤ採用によるモータの高回転化に対応するために IPM (Interior Permanent Magnet) 構造を、小型化を実現するために集中巻きステータコイルをそれぞれ採用した。モータの性能は、最高出力 2.8 kW、最大トルク 11 Nm、実用域効率 75% 以上、最高回転数 9000 r/min 以上を達成し、ビジネス用途として必要な動力性能を満足する駆動用モータを実現した。

生産工程については、電動カート生産用の既存モータ量産設備にて製作可能とするため、分割コアステータ構造やコイル結線用バスリングなどを採用し、生産性向上と低コスト化にも配慮した。

ABSTRACT

A new DC brushless motor, which has an equivalent driving performance to a 50 cm³ displacement scooter engine, has been developed to be equipped in a new electric motorcycle for business applications. The requirement for the maximum motor torque was mitigated by applying reduction gears and the drive unit that can be mounted on the wheel side was realized by reducing the size of the motor, together with the united structure of PDU (Power Drive Unit). In this motor, IPM (Interior Permanent Magnet) structure was implemented to cope with the high rotation speed of the motor, and the concentratedly wound stator coil was implemented for downsizing. The motor performances with the maximum power of 2.8 kW, the maximum torque of 11 Nm, the practical efficiency of 75% or more, and the maximum motor speed of 9000 r/min or more, were achieved, satisfying the specifications required for the drive train unit of business application motorcycles. In production processes, the split core stator structure and the bus rings for coil wiring were adopted to make it possible to manufacture them in the existing mass production facilities for the electric carts production, taking the cost reduction into good account as well.

1. ま え が き

近年の環境問題への関心の高まりから、CO₂ 排出量削減に向けた取り組みの一つとして、電動車両の普及が進められてきている。Honda は、1994 年の電動二輪車 CUV-ES (Fig. 1) ⁽¹⁾ の量産化以降、現在まで二輪車の電動化技術に取り組んできた。そして、これまで蓄積した電動化技術とノウハウをさらに進化させ、2010 年に、ビジネス用途に適した電動二輪車 EV-neo を新たに開発した (Fig. 2)。これら 2 機種の様式比較を Table 1 に示す。今回開発した車

両は、高出力型のリチウムイオンバッテリーを採用することにより 20 分でバッテリー容量 0 – 80% までの急速充電を可能とし、かつ、外気温 -10℃ の低温でも十分な走行性能 (放電性能) と短時間充電 (充電性能) を実現した。登坂性能は、一人乗り、30 kg 積載状態にて 12 度の登坂発進が可能であり、排気量 50 cm³ のエンジンスクータと同等の動力性能を実現した。本モータは、上記動力性能の実現を目標に新たに開発されたものである。

本稿では、今回開発したモータへの適用技術と性能について述べる。

*二輪 R&D センター

Table 1 Specifications of previous and developed vehicle models

	Previous model	Developed model
Dimensions L X W X H (m)	1.785 x 0.615 x 1.035	1.830 x 0.695 x 1.065
Vehicle mass (kg)	130	106
Rated output (kW)	0.58	0.58
Maximum power (kW)	3.3	2.8
Maximum torque (Nm)	9	11
Battery type (V-Ah)	Ni-Cd 86.4 V-20 Ah	Lithium-ion 72 V-12.6 Ah



Fig. 1 Previous mass production electric motorcycle (CUV-ES)



Fig. 2 Newly developed electric motorcycle (EV-neo)

2. 開発のねらい

一般に電気自動車 (EV) は、十分な航続距離を実現するとバッテリー搭載量が多くなり、重くて高価なものとなる。この状況を踏まえ EV-neo の開発要件の重点は、軽量化および低コスト化に置かれ、最小限のバッテリー搭載量で目標の航続距離を確保することが必要となった。このためモータの開発においては以下を主なねらいとした。

- (1) 駆動ユニットの小型化
- (2) 駆動効率の向上
- (3) 低コスト化

一般的なエンジンスクータの場合、エンジンの動力はベルトコンバータによる変速と固定減速比の減速ギヤを介して駆動輪へ伝達される。先に紹介した、CUV-ES も、ベルトコンバータと減速ギヤの組合せを採用した (Fig. 3)。そのためモータは、これまでエンジンが搭載されていた位置と同じ位置に搭載するほかなく、駆動ユニット全体の大きさはエンジンスクータと同等となっていた。これに対し今回は、ベルトコンバータ廃止とモータの小型化により、駆動ユニット全体の小型化と共に、駆動効率向上を図ることをねらいとした。また、電動カート用の既存モータ量産設備にて製作可能とする構造を採用し、生産性の向上による低コスト化の実現を目指した。

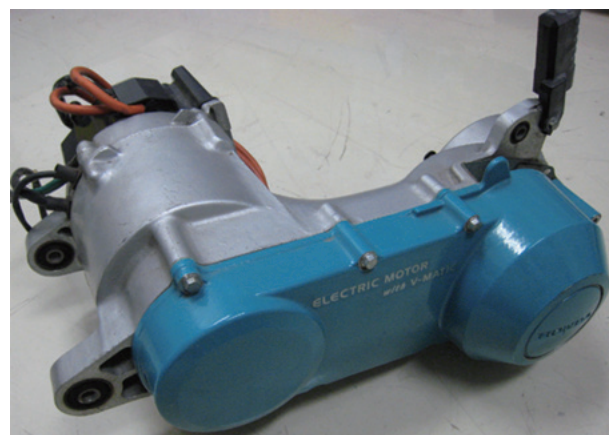


Fig. 3 External view of belt converter-type transmission

3. 適用技術

駆動用モータの主要諸元を Table 2 に、駆動ユニット全体を Fig. 4 に示す。

モータは、DC ブラシレスモータであり、CUV-ES の SPM (Surface Permanent Magnet) 構造に対し、高回転での効率および強度に優れる IPM (Interior Permanent Magnet) 構造を選択した。

モータの冷却は、冷却ファンなどの冷却用追加部品による重量増をさけるため、駆動ユニットへの伝熱と走行風による自然空冷を選択した。

3.1. 駆動ユニット構造

3.1.1. クラッチ同軸化

駆動ユニット部の詳細を Fig. 5 に示す。遠心クラッチを採用することにより、モータ効率が低下する低回転高トルク域での運転を回避し、駆動効率の向上を図った。また、0 r/min でのモータ高トルク状態の維持を回避することにより、モータと PDU への電流負荷を低減し、モータや PDU の耐熱性能を上げることなく、坂道発進等の低速高

Table 2 Major specifications of new and previous motors

	Previous motor	Developed motor
Type	DC brushless	DC brushless
Magnets	Nd-Fe-B	Nd-Fe-B
Number of poles	4	8
Rotor type	SPM	IPM
Winding type	Distributed winding	Concentrated winding
Cooling system	Forced air cooling	Natural air cooling

負荷運転時の信頼性を確保した。さらに、停止時はモータと駆動輪が切り離されるため、電源 OFF 時の車両取り回し荷重の低減が図られた。

上記のクラッチをモータと同軸に配置し、駆動ユニットの小型化を図った。モータのロータシャフトを中空構造とし、その中にドライブシャフトを貫通させクラッチを同軸

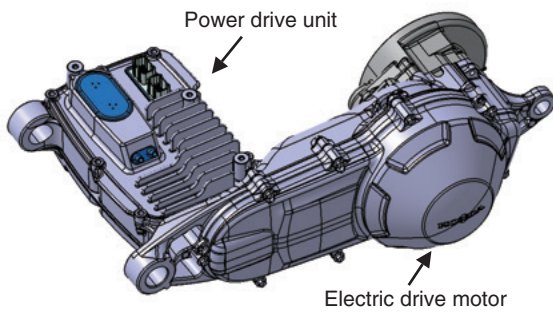


Fig. 4 External view of drive unit assembly (EV-neo)

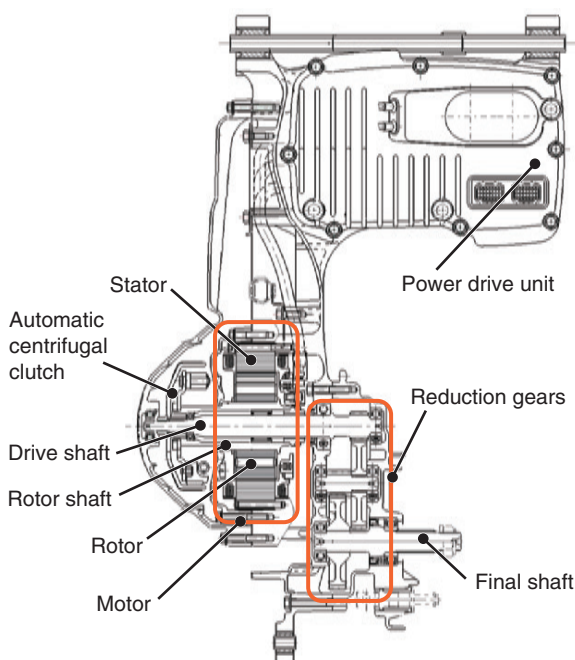


Fig. 5 Sectional view of drive train unit

化した。クラッチの同軸化とモータの小型化により、車両のバンク角を確保しながら、モータをホイールサイドに搭載可能とするとともに、駆動ユニットの伝達効率向上と小型化を実現した。

3.1.2. PDU との一体化

駆動ユニットと PDU とを一体化し、パワーユニット全体の小型化を図った。クラッチ同軸化により、モータをホイールサイドに搭載できたため、利用可能となった駆動輪前方スペースに PDU を搭載し、駆動ユニットと一体化した。これにより PDU 冷却のための十分なヒートマスが確保でき、CUV-ES では強制空冷としていた PDU 冷却を自然空冷とすることができた。またモータと PDU をユニット内で結線することができ、PDU からモータへの送電ロスは、車体に PDU を搭載する場合に比較して 50% 以上低減することができた。さらにユニット外で結線する場合の屈曲部の保護、防水対応を省略することが可能になり、部品点数削減による低コスト化に寄与した。

3.2. 高回転化

モータに減速機構を付加し、モータを高回転仕様とすることで、駆動ユニットの小型化と重量低減を図った。

課題の主眼を、減速機構の併用による駆動フリクションの増加においた場合、駆動輪をダイレクト駆動するインホイールモータも選択肢の一つである。しかし、減速機構を併用したモータと比較した場合、減速比の制限により、要求されるモータトルクは大きくなる。

磁石トルクのみを用いるモータの場合、トルクを大きくするには磁石による鎖交磁束や極数を増加させる必要がある。そのためにはモータ外径や積厚を増す必要があり、また、それにより磁石、電磁鋼板、コイルの使用量が増えるため、モータは大型化し重量が増加する。

以上より、駆動ユニットは、モータ最大トルクを低減できる減速機構の併用を選択し、一人乗り、30 kg の荷物を積載した状態で 12 度の登坂発進を可能とすることを目標とした。このときの駆動輪の要求軸トルクは 150 Nm である。この要求軸トルク実現のため、生産設備上のモータ形状の制限と高回転化によるフリクション増を考慮しつつ、減速比を 13.9、モータ最大トルクは 11 Nm、最高回転数 9000 r/min を目標として設定した。

3.3. IPM モータ

ベルトコンバータを廃止するためには CUV-ES のモータに対して最大トルクを 20% 向上、最高回転数を 50% 向上させる必要がある。さらに、より広範な回転数域の効率向上が必要となるため、磁石トルクに加えてリラクタンストルクを併用する IPM 構造のモータを選択した。また高回転でのロータ強度を確保するため、1 極あたりの磁石を 2 分割し、ロータヨーク内に配置した。ロータヨークおよ

びステータコア形状の比較を Fig. 6 に示す。ロータ形状は、CUV-ES のロータに対して外径を 10% 大径化し、極数は 4 極から 8 極に増加させることで要求最大トルクを満足する磁束量を確保した。また、CUV-ES に対し保磁力が 7% 高い磁石を採用することで磁石形状の薄型化が可能となり、ロータを大径化しながらも磁石使用量は CUV-ES に対し同等にできた。

3.3.1. リラクタンストルクの併用

リラクタンストルクを併用するモータのトルクを T_q 、磁石トルクのトルク定数を K_t 、リラクタンストルクのトルク定数を K_{rt} 、 d 軸電流と q 軸電流をそれぞれ i_d 、 i_q 、 d 軸インダクタンスと q 軸インダクタンスをそれぞれ L_d 、 L_q 、極対数を P_n 、起電力定数を K_e とすると、式 (1)、(2)、(3) のように表わされる。式 (1) の右辺第 1 項が磁石トルク、第 2 項がリラクタンストルクを表す。

$$T_q = K_t \cdot i_q + K_{rt} \cdot i_d \cdot i_q \quad (1)$$

$$K_t = P_n \cdot K_e \quad (2)$$

$$K_{rt} = P_n (L_d - L_q) \quad (3)$$

CUV-ES で採用した SPM 構造のモータでは、 L_d と L_q は同じ値となるためリラクタンストルクは発生せず磁石トルクのみとなる。

ここで、モータの高回転での動作においてモータの誘起電圧が電源電圧以上となる場合は、弱め界磁制御による磁石界磁量の抑制が必要となる。しかし、磁石界磁量を抑制するための弱め界磁電流は、トルク発生に寄与しないためモータ効率を低下させる。

磁石トルクのみを用いる SPM 構造のモータの場合、弱め界磁電流を低減し高回転時の効率を改善するには、誘起電圧の上昇を抑制する必要がある。巻線のターン数の変更により K_e を低減し誘起電圧の上昇を抑制することができるが、式 (2) より同時に K_t も低減される。つまり高回転時の効率は改善されるが、 K_t の低減によりトルク発生に必要な電流が増加するため、低回転高トルク時の効率は低下する。以上より磁石トルクのみを用いる SPM 構造のモータでは広範な回転数域の効率向上は困難となる。

一方、磁石トルクに加えてリラクタンストルクを併用する IPM 構造のモータの場合、SPM 構造のモータと同様に

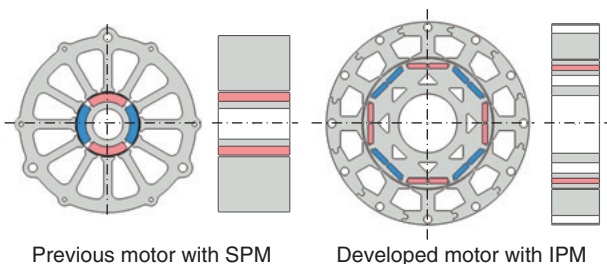


Fig. 6 Comparison of shapes between previous and developed motors

K_e の低減により K_t が低減されるため、同一電流下での磁石トルクは減少するが、 K_{rt} によるリラクタンストルクを追加することができる。これにより、低回転時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高回転域の運転ができるため、SPM 構造に対してより広範な回転数域での効率向上を図ることができる⁽²⁾。

式 (3) よりリラクタンストルクは L_d 、 L_q の差分により発生し IPM 構造の場合 $L_d < L_q$ となる。そのため電流位相角 $90^\circ - 180^\circ$ の範囲で磁石トルクにリラクタンストルクを追加することができる⁽³⁾。EV-neo のモータは、ロータヨーク形状の改良により最大トルク発生時に全トルクの 20% 以上をリラクタンストルクによるものとすることができた。今回開発したモータの電流位相角と発生トルクの磁場解析確認結果を Fig. 7 に示す。

3.3.2. ロータ強度

高回転化を実現するためにはロータ強度の確保が課題となる。遠心力によるロータヨークへの応力を緩和するため、1 極あたりの磁石を 2 分割しヨーク内に配置した (Fig. 8)。分割配置により応力分担箇所を磁石両端部の 2 箇所からセンターリブを追加した 3 箇所に増加させた。これにより、遠心力による応力集中を低減し、高回転時のロータ強度を確保した。

3.3.3. 磁石接着の廃止

磁石はロータヨークへ接着固定しないことで、生産性向上によるコスト低減を図った。接着剤の使用は、塗布や熱

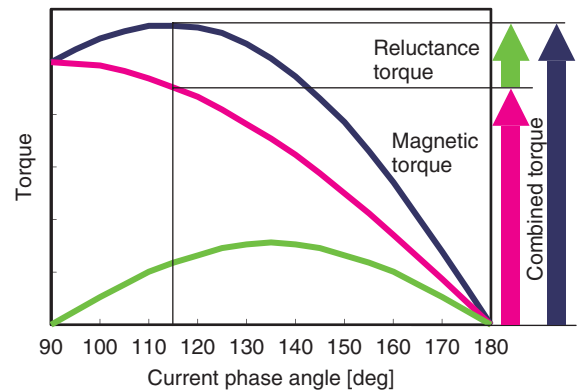


Fig. 7 Torque characteristics in relation to current phase angles

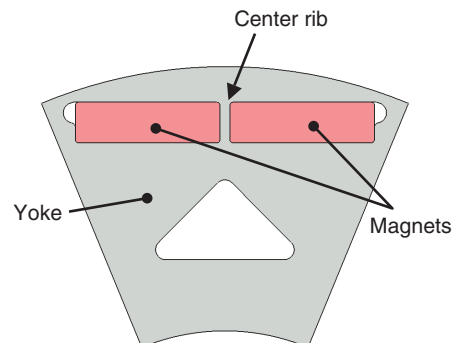


Fig. 8 Rotor structure

硬化のための管理が必要となり、生産性向上を難しくしていた。今回採用した IPM 構造の場合、磁石はロータヨークに囲まれるため、磁石をロータヨークへ挿入した状態でその位置を保持できる。しかし磁石挿入のためには、ロータヨークと磁石の間に、0.1 mm 程度のクリアランスが必要であり、このクリアランス内で磁石は移動が可能となる。そのため、ロータの回転に伴って、磁石が繰り返しロータヨークに衝突するため、磁石に施された防錆用メッキの割れや磨耗が懸案とされる。これに対処するために、柔軟性に優れたスルファミン酸ニッケルメッキを採用し、車両の加減速を想定したロータの加振試験により、耐久性能を満足するメッキ膜厚などについての条件を得た。これにより磁石接着廃止の成立性を確認できた。

3.4. 集中巻ステータ

ステータの巻線には、CUV-ES で採用した分布巻きに対して、コイルエンド高さを低くできる集中巻を採用した。ステータ形状を Fig. 9 に示す。集中巻の採用により CUV-ES のモータに対して、コイルエンド高さを 52% 低減し、モータの小型化に貢献した。集中巻きの採用に加え、ホイールサイドへの搭載に適したモータ形状とするため、CUV-ES に対しステータ外径を 17% 大径化、コア積厚を 31% 薄型化した (Fig. 10)。

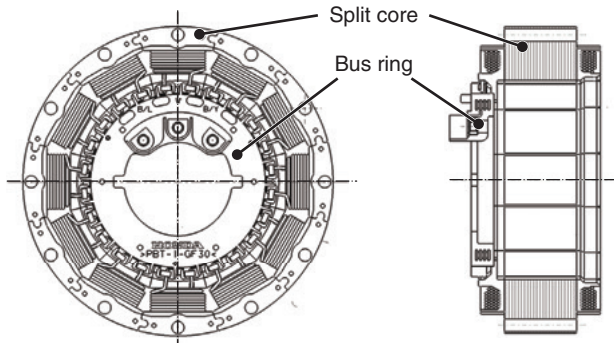


Fig. 9 Structure of stator

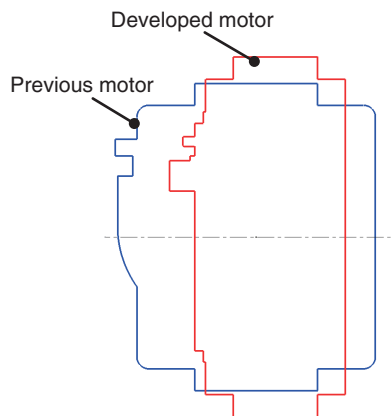


Fig. 10 Comparison of contours of new and previous motors

3.4.1. 分割コア

電動カート用の既存モータ量産設備にて製作可能とするため、既存モータと同一構造の分割コアステータを採用した⁽⁴⁾。分割コア採用により、集中巻きに適した既存のボビン型巻線機を用いることができた。また分割構造により、一体でステータコアを製作する場合と比較して、材料歩留まりを 18% 向上し、低コスト化に寄与できた。Fig. 11 に分割コア形状を示す。

3.4.2. 自己融着巻線

巻線には、加熱によって巻線間を接着できる自己融着巻線を採用した。自己融着巻線の断面構造を Fig. 12 に示す。自己融着巻線は導体表面の下層に絶縁層、上層に融着層を有し、巻線工程後のコイルに熱を加えることで上層の融着層が溶融し、巻線同士を接着することができる。自己融着巻線の採用により、含浸ワニスによる巻線の接着工程を廃止でき、工程削減による生産性の向上に寄与した。

3.4.3. バスリング

集中巻きしたコイルの各相を結線するためにバスリングを採用した。Fig. 13 にバスリングの構造を示す。コイルと

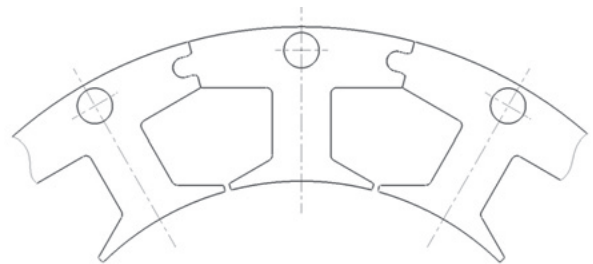


Fig. 11 Split core structure

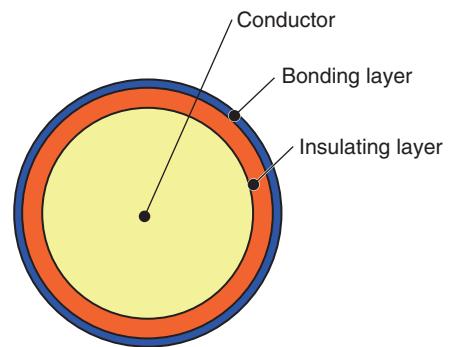


Fig. 12 Cross-section of self-bonding magnet wire

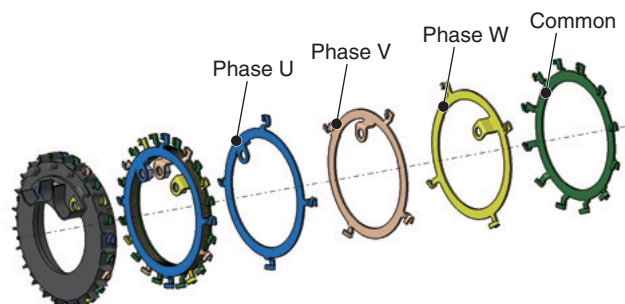


Fig. 13 Structure of bus-ring

バスリングを結線した後の等価回路は Fig. 14 に示すようになり、UVW の各相にコイルを 4 個並列接続した状態となる。このバスリングをコイルエンド部の内径側に配置することで、渡り線によるモータの軸方向への寸法拡大を抑制し、モータの薄型化を可能とするとともに、バスリング内の電極板も小型化することができた。

コイルとバスリングの結線方法としては、フュージングを採用した。フュージングは Fig. 15 に示すようにまずバスリングの U 字形状部にコイル端を機械的に仮止めし、続いて、上下の電極間に流される一次電流の熱でコイルの絶縁層皮膜を剥離し、次に、二次電流にて表面を溶着させ電氣的に接合する方法である。このフュージングの採用により、他の結線方法で必要な、コイル絶縁層の剥離工程を削減することができ、短時間で結線することを可能とし、生産性の向上が図れた。

バスリングの構造については、既存モータのバスリングに対し、各相間の沿面距離を拡大した専用の内部構造によって絶縁性能を強化しながらも、コイルとの結線部形状は、既存モータのバスリングと同一構造とすることができた。これによって、現有のフュージング設備が流用でき、コスト低減を実現できた。

3.5. 回転角度センサ

ロータの回転角度センサはホール IC 式を採用し、検出角度誤差の補正機能を PDU に持たせることで、センサの

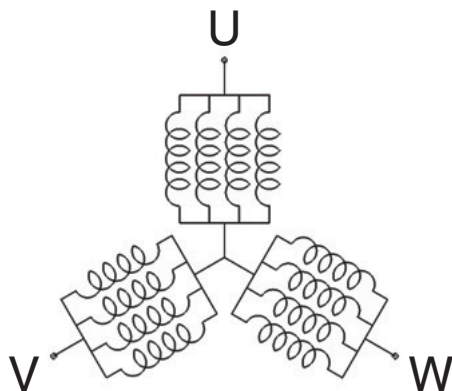


Fig. 14 Equivalent circuit for the motor

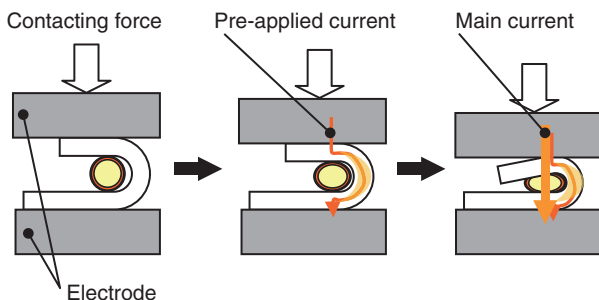


Fig. 15 Process of welding by fusing

機械的な位置調整を不要とし、生産性の向上および部品交換時の工数削減を図った。センサ部の詳細を Fig. 16 に示す。ホール IC は高温動作時に誤差を生ずるため、センサをクラッチとは反対側に配置することで、クラッチからの受熱を回避し、センサの信頼性を確保した。また、センサ用リング磁石をバスリングの内側に配置することで、センサ部の軸方向への寸法拡大を抑制し、モータの小型化に寄与した。

ブラシレスモータは回転角度センサの信号を基準としてモータの通電制御をおこなうため、センサの取付け位置のばらつきや、センサ用磁石の磁極位相のばらつきによって検出角度に誤差が生ずると、モータ出力や効率のばらつきにつながる。この課題に対し、CUV-ES ではセンサの取付け位置を機械的に調整することで対応していたために、生産性向上を難しくしていた。EV-neo においては、モータの誘起電圧波形とセンサ信号を比較し、角度誤差を検出する回路を PDU に内蔵させることによって、完成車検査時における電氣的な角度誤差補正を可能とし、生産性の向上が図られた。またこの補正機能により、特別な道具を用いることなく角度誤差の補正をすることを可能とし、サービス時の部品交換工数削減にも寄与した。

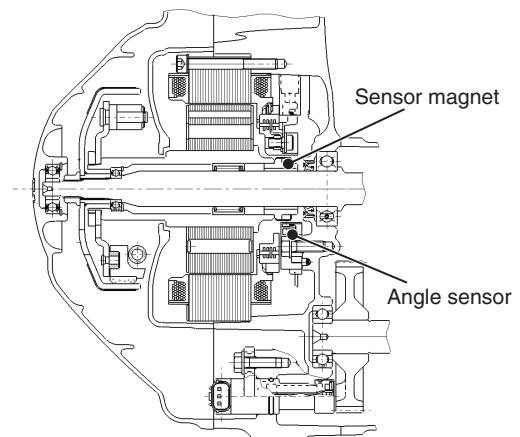


Fig. 16 Layout of angle sensor

4. モータ性能

4.1. 出力

三章にて述べた適用技術により、モータ出力は、最高出力 2.8 kW、最大トルク 11 Nm、最高回転数 9000 r/min の目標性能を達成した。CUV-ES に対してトルク密度は 37% 向上し、モータ重量は 11% 低減した。出力確認結果を Fig. 17 に示す。CUV-ES に対して最大トルク 22% 向上、最高回転数 52% 向上とすることでベルトコンバータを廃止し、固定減速比にて、目標とする一人乗り、30 kg 積載における 12 度の登坂発進性能と、最高速性能の両立を実現した。

4.2. 効率

モータの最高効率は92.7%で、また、実使用領域において75%以上の効率を達成した。効率確認結果をFig. 18に示す。ベルトコンバータ廃止による駆動フリクション低減、強制空冷の廃止と小型化による重量軽減により、車両全体としては、車速30 km/hの定地走行において航続距離34 kmを実現した。

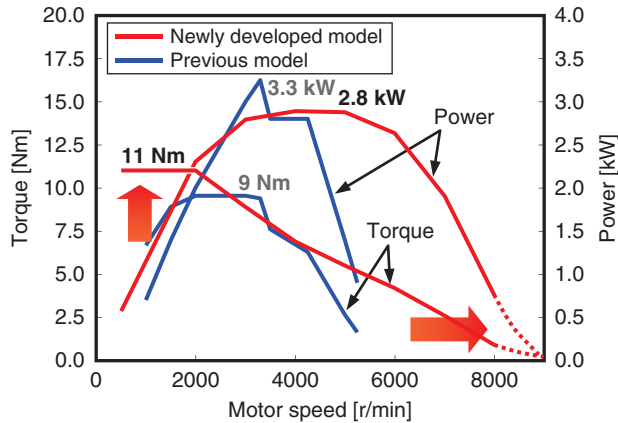


Fig. 17 Comparison of output performance for developed and previous motors

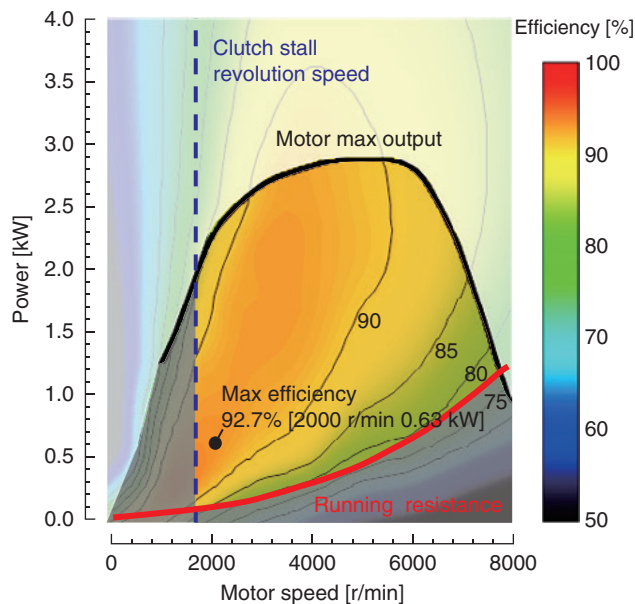


Fig. 18 Measured motor efficiency characteristics

5. まとめ

電動二輪車用駆動モータを開発し、以下の項目を実現した。

- (1) クラッチのモータ同軸配置、集中巻きステータコイルの採用によるモータの小型化により、駆動ユニットの小型化を実現した。
- (2) 電動二輪車専用のIPMモータの開発により、高回転

化を実現し、ベルトコンバータを廃止し、駆動フリクションの低減を実現した。

- (3) 分割コアステータ、コイル結線用バスリングなど既存モータと同一構造を採用することにより、現有モータ量産設備での生産を可能とし、生産性向上による低コスト化を実現した。

参考文献

- (1) 中澤祥浩, 熊谷千昭: 実用電気スクータの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.6, p.17-23
- (2) 瀧澤一晃, 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
- (3) 福嶋達也, 岩井明信, 山口憲隆, 篠木弘明: 燃料電池車FCXクラリティ用駆動モータ, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.60-66
- (4) 市川勝久, 廣瀬好寿, 山本隆弘, 山岸善彦, 石川智明: 電動カート「モンパルML200」の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.2, p.28-35

■ 著 者 ■



小林 直 樹