

CIVIC Hybrid 用モータの開発

Development of the Motor for the CIVIC Hybrid

小 川 博 久*
Hirohisa OGAWA

福 田 健 児*
Kenji FUKUDA

要 旨

5人乗り乗用車燃費世界一をめざしたハイブリッドカー CIVIC Hybrid の補助動力として、薄型 DC ブラシレスモータを開発した。そのコンセプトは、量販エンジンと量販車体を使用しハイブリッドカーを成立させる事であり、INSIGHTでは専用のエンジンと車体で構成したのに比較して、多くの課題があった。INSIGHTに対し車体が重いCIVICでは、動力性能の確保と減速時の回生エネルギーの増加に対応するため、エンジン排気量増加とモータ回生性能向上が必要である。しかし車体の全幅は INSIGHT と同一のため、回生性能向上に見合うモータ幅の増加を行う事はできない。そこで、モータの開発目標は幅を維持したままで性能向上を行う事とした。その達成手法は、トルク定数の増加と各部の損失低減を行う事である。具体的には、部品の機能統合による軸方向スペース確保によりステータ積厚を増加し、また新たな巻き線方法の採用により巻き線径とティース幅の拡大を行った。その結果、モータ幅を維持したままモータ回生トルク約30%向上と、実用域でのモータ平均効率約3%向上を実現した。

ABSTRACT

A thin DC brushless motor was developed as auxiliary power for the Civic Hybrid, which is positioned to take the world lead in fuel consumption for five-passenger automobiles. The concept was to create a hybrid car using a mass-production engine in a mass-production car body. This raised more issues than the Insight, which was made with an engine and body specifically designed for that purpose. The Civic has a heavier body than the Insight. In order to assure its power performance and increase the energy regenerated during deceleration, therefore, the engine displacement had to be increased and the regenerative performance of the motor had to be improved. However, the Civic body has the same width as the Insight, so it was not possible to increase the motor width in correspondence with the regenerative performance. The objective in development of the motor, therefore, was to improve performance while keeping the motor the same width. The methods used to achieve this objective were to increase the torque constant and to reduce the losses in all parts involved. Specifically, the space gained in the axial direction by functional integration of parts made it possible to increase the cumulative stator thickness, and the adoption of new coil winding methods made it possible to enlarge the coil diameter and the width of the teeth. As a result, the motor regenerative torque was improved approximately 30% while maintaining the same motor width, and the average efficiency of the motor in the practical use area was improved approximately 3%.

1. まえがき

地球規模の環境問題と省資源の観点から、自動車の低燃費化とクリーン化が求められる中、Hondaは、1999年からIMA(Integrated Motor Assist)システムを搭載した2人乗りの超低燃費ハイブリッドカー INSIGHT⁽¹⁾を販売している。2001年、5人乗り4ドアボデーのCIVICに、改良を

施した IMA システムを搭載した CIVIC Hybrid を発表した。IMA システムにおけるモータは、加速時のアシストと減速時のエネルギー回収、およびアイドルストップを違和感なく行うための素早いエンジン始動を行う。CIVIC Hybrid に搭載するモータは、回生性能を向上させつつ軽量コンパクトで量産性の高いものにするべく開発を行った。本稿ではこれを実現したモータ技術について紹介する。

*栃木研究所

2. 開発のねらい

CIVIC Hybrid用モータの開発のねらいは以下の3項目と新機能の実現であった。

2.1. 回生トルクの増加と実用域の効率向上

INSIGHT に対し、車体重量の増加と気筒休止等の採用によるエンジンフリクション低減により、モータが回収可能な減速エネルギーが増大するため、それに見合う回生トルクの向上が必要となる。ここで、モータの効率をそのまま回生トルクの向上を行うと、損失も増加し自然空冷で成立しなくなる。この場合、冷却システムが新たに必要になり、スペース、重量、および全体効率を悪化させ、ハイブリッドシステムのメリットが失われる。そこでモータの回生トルク増大と広範囲な実用使用域での効率向上を同時に行う必要があり、特に高負荷側の損失低減が重要になる。

2.2. コンパクト化

専用のエンジンおよび車体で構成した INSIGHT に対し、CIVIC Hybrid は、そのコンセプトである量販エンジンと量販車体で成立させる事を目標にしたため、モータのコンパクト化が必要となった。具体的には、INSIGHTの3気筒1.0Lエンジンに対し、4気筒1.3LエンジンをINSIGHTと同一の1695mmの全幅を持つCIVIC車体に搭載するため、モータ幅寸法を変えずに減速エネルギー増加に見合う回生性能と効率向上を目標に開発を行った。

2.3. 軽量化と生産性向上

CIVIC Hybrid で目標とした燃費向上を達成するために、車両全体で軽量化を推し進め、モータも平行して軽量化を図った。また、5人乗り4ドアボデーのCIVIC Hybridで普及拡大するために、量産性についても更なる改善を行った。

以下にこれらのねらいを達成するための具体的な技術説明を行う。

3. 回生トルクの増加と実用域の効率向上

上記の目的を達成するために、従来のモータに比べトルク定数を増加し、かつ各部の損失低減を図った。ここで、トルク定数の増加は単に回生トルクの向上だけではなく、実用域での効率向上にも貢献する。一般に、トルク定数を増加させるとモータの高効率領域を低回転側に移動させることができる。従来のモータのまま CIVIC に適用すると、Fig. 1 に示す様にモータの高効率領域は実用使用域より若干高回転側にある。そこで、トルク定数を増加させる事は実用域の効率向上にもつながる。

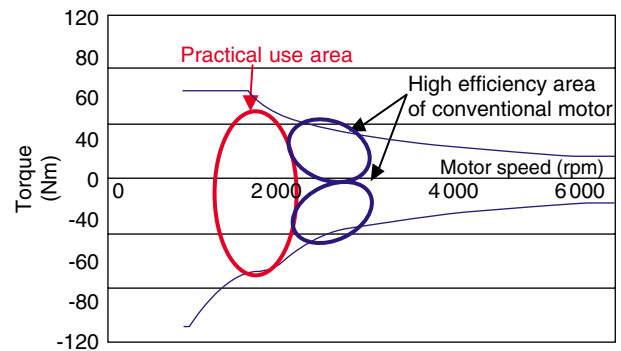


Fig. 1 10-15 Mode traveling area

3.1. トルク定数増加

トルク定数の増加は主にステータの積層方向厚さ(以降、ステータ積厚)の増加で行う事とした。しかし従来構造のままでは軸方向スペースが確保できず不可能である。そこで次項での説明のように、モータ内部品の機能統合による軸方向スペースの確保によって、Fig. 9に示す様にステータ積厚を13%増加させた。主に本改良を行うことで、トルク定数を従来比約16%増加することができた。

3.2. 銅損低減と飽和磁束密度向上

銅損を低減するため、巻き線径を1.3mmから1.5mmに拡大し巻き線抵抗を33%低減した。また、Fig. 2に示す様にティース幅を拡大し飽和磁束密度を向上させ、高トルク発生時の磁気飽和を改善することで、高トルク領域の損失低減を図った。

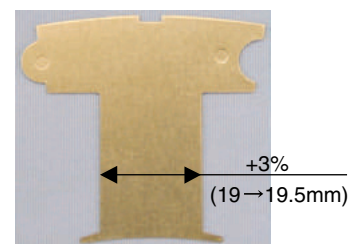


Fig. 2 Width of teeth

ここで、巻き線径拡大とティース幅拡大を従来の手法のままでも同時に行うと、巻き線が太くなるのに対し、巻き線を入れるスペースが減少するため、巻き数が大幅に減少し性能低下が起こる。そこで、以下で説明する新しい巻き線方法を適用した。

3.3. 非対称巻き

Fig. 3(a)に示す様に全周均一な厚さのインシュレータで覆われているティースに巻き線を行うと、中央部で巻き太りが起こり隣接する巻き線が接触するようになる。そこで、巻き太りが中央で重ならないよう対策する事で、径が大き

くなった巻き線を使用しても巻き数を確保できる。具体的手法としては、Fig. 3(b) に示す様にインシュレータの厚みを非対称にし、巻き太り位置を中央ではなく、互い違いにずれるようにした。この結果、性能を低下させることなく巻き線径拡大とティース幅拡大を可能にした。

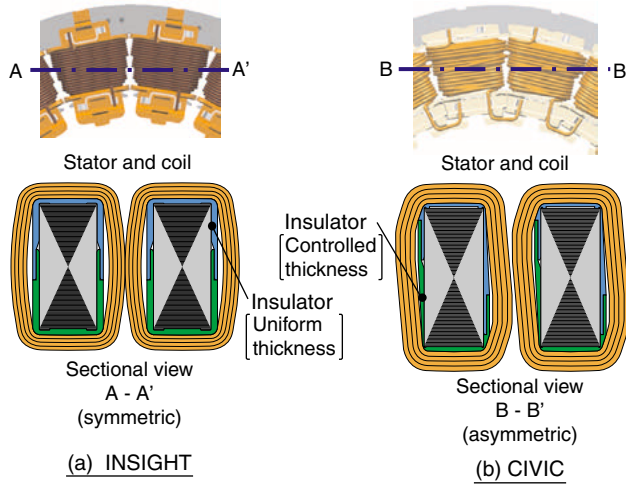


Fig. 3 Comparison of stator and coil

3.4. 珪素鋼鉄の打ち抜き方向の見直し

更に、珪素鋼鉄の打ち抜き方向の見直しによる性能向上も行った。一般に、無方向性珪素鋼鉄を使用するにあたっては、方向による特性差が無いものとして、歩留まり優先で打ち抜きを行う。また、分割ステータの場合は、特にティース部とバックヨーク部で磁束の流れる方向が直行しており、打ち抜き方向を規制しないのが通常である。

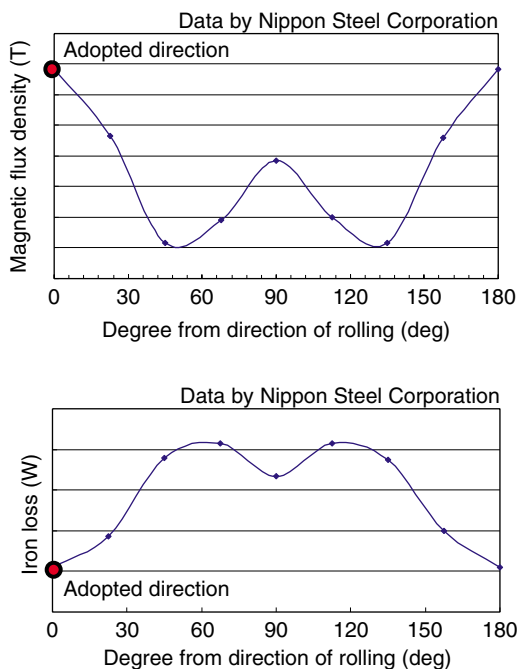


Fig. 4 Magnetic flux density and iron loss

しかし、無方向性珪素鋼鉄でも Fig. 4⁽²⁾に示す様に方向による若干の特性差がある。そこで、本モータにおけるステータ各部磁束の量及びその方向を Fig. 5 に示す様に詳細に解析し、最適な打ち抜き方向を検討した。それによると、ティースに流れる磁束を優先し、Fig. 6に示す様にモータ径方向と圧延方向を合せるのが良いことが明らかになり、それを採用した。その結果、低回転高トルク域での磁気飽和の改善と鉄損低減が図れ効率を従来比約1.5%向上する事ができた。

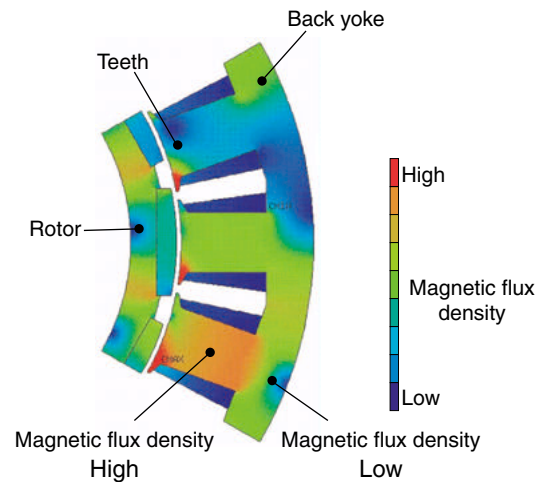


Fig. 5 Simulation of magnetic circuit

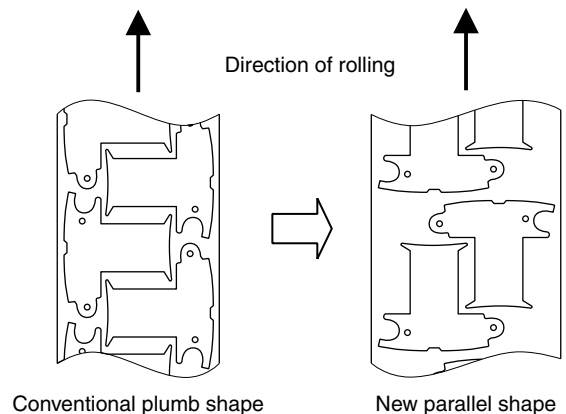


Fig. 6 Shape of press working

3.5. 回生トルクの増加と実用域の効率向上まとめ

以上の対応を行う事により、Fig. 7 に示す様に最大回生トルクの従来比約30%向上と、モータ効率向上(Fig. 8)により、実用域でのモータ平均効率約 3%向上を達成した。また、Table 2 にモータ主要諸元を示す。

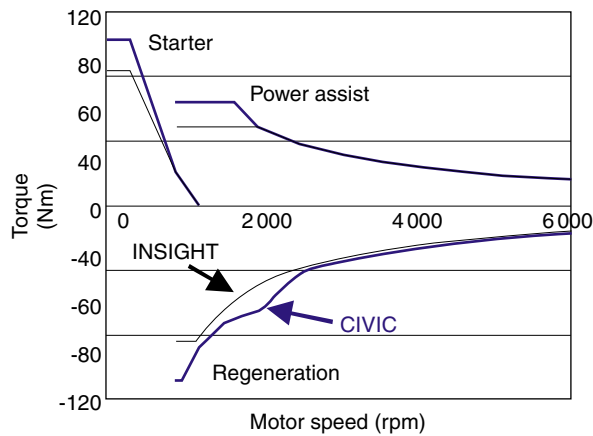


Fig. 7 Motor performance curve

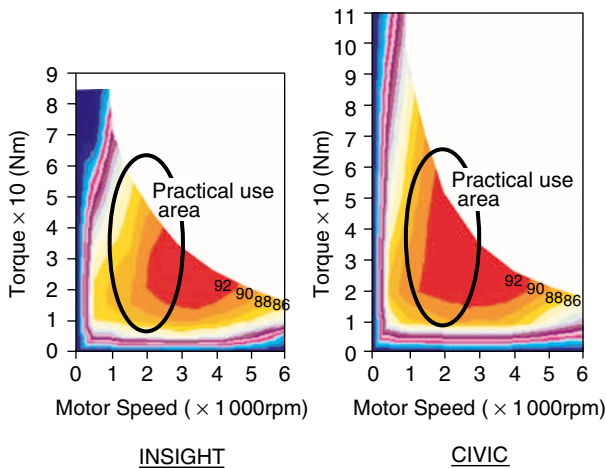


Fig. 8 Motor efficiency

Table 2 Motor specification

Motor type	DC brushless	
	(1) Power assist	(2) Regeneration
Max power	10kW	12.4kW
Max torque	49Nm (103Nm at engine Start)	108Nm

4. コンパクト化

回生トルク向上と効率向上を行いながらモータ幅を維持するため、Fig. 9に示す様にモータ内部品の機能を統合し軸方向スペースを見直した。従来構造ではバスリングの固定機能と、巻き線接続部の絶縁用シリコン樹脂の注入型枠機能を有していた樹脂カバーを廃止する事でスペースを確保した。この二つの機能を有していた樹脂カバー廃止にあたり、バスリングの固定は各相ごとに別部品であったものを一体部品とし、それ自体で保持できる構造に変更した。もう一つの型枠機能は、隣合うインシュレータとのクリアラン

スをシリコン樹脂が流れ落ちない間隔とし、外周側はバスリング、内周側はインシュレータで型枠を構成した。

これにより、Fig. 10に示す様にモータ幅を変えず、ステータ積厚約13%増加を実現した。

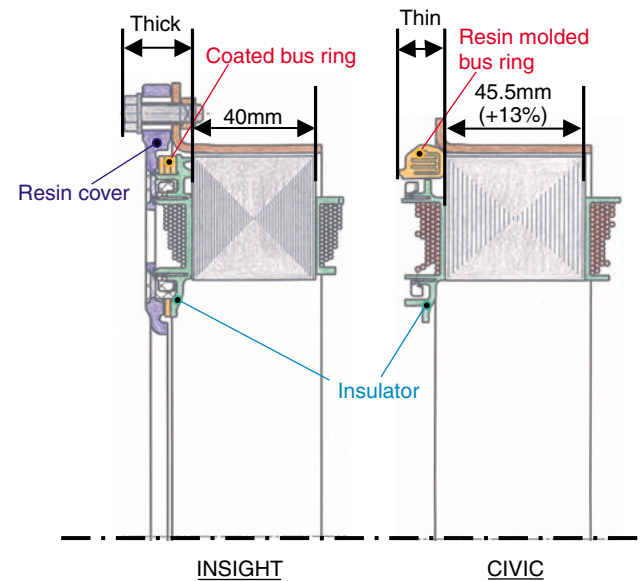


Fig. 9 Cutaway view of stator

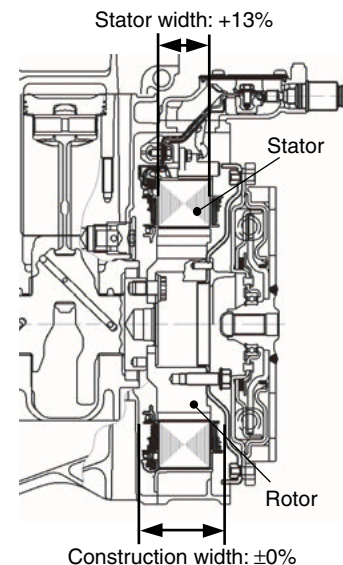


Fig. 10 Cutaway view of motor

5. 軽量化と生産性向上

5.1. 焼結拡散結合ロータ

Fig. 11に示す様に、ロータは外周部にマグネットを固定し磁気回路を構成する機能と、内周部でクランクとトランスミッションをつなぎトルク伝達を行う二つの機能を負っている。従来は、トルク伝達機能を成立させるため炭素鋼を

選択し、この材料を使うに当たっての最善の方法と考えるロストワックス製法を採用していた。それに対し、内・外周それぞれ必要とされる特性の材料を組み合わせる事が可能な焼結拡散結合を採用する事により、内周部は高強度材、外周部は軟磁性材を用いる事を可能にし、材料密度を下げつつ締結強度の確保と飽和磁束密度を30%向上させた。これにより、性能向上と15%の軽量化を達成した。

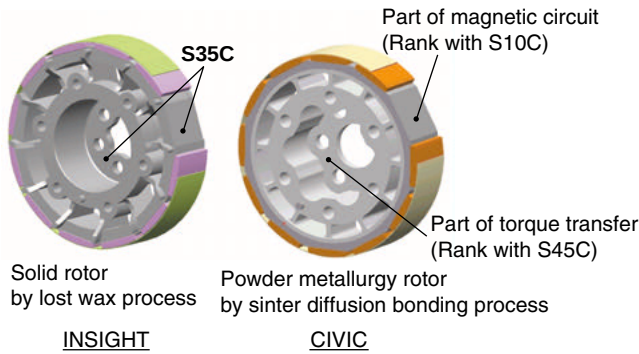


Fig. 11 Rotor construction

5.2. 樹脂オーバーモールドバスリング

バスリングに求められる性能は、各相間の絶縁(耐短絡性能)及びGND絶縁(耐地絡性能)を満足しながら各相への配電機能を成立させる事である。Fig. 12に示す様に、従来のバスリングは1相ごとに絶縁処理を行い、ステータ組み立て時に1本ずつ取り付ける構造であった。それに対し今回は、浮き成形樹脂モールド技術の採用により、3本一体部品にする事を可能にし大幅な生産性向上を図った。

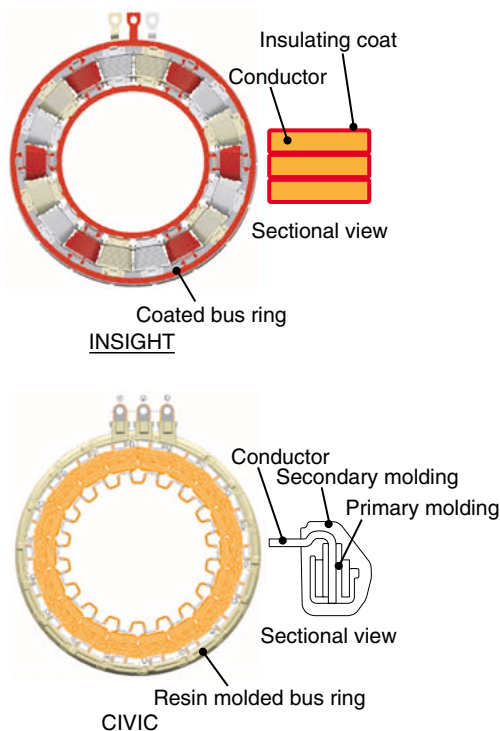


Fig. 12 Bus ring construction

本バスリングの構造は、相间絶縁機能を1次モールド体で確保し、GND絶縁を2次オーバーモールド樹脂で確保する。このため、2次モールド樹脂で1次モールド体を完全に包み込む事が必要であり、型内の支えピンで1次成形体を浮かせながら、樹脂の硬化タイミングに合せピンを抜き、ピン跡を残さず完全に樹脂で包み込んでいる。

この技術の採用により、絶縁性能を確保しながら製造及び組み立て時間で従来比約50%短縮するという大幅な生産性向上を達成した。

5.3. 中性点直接配線

従来は、Fig. 13に示す様に別部品である中性点バスリングを使用し結線を行っていた。これに対し、専用バスリングを使用せずに巻き線で中性点を形成する構成にした。具体的には、分割ティースに突極集中巻きを行う工程で、中性点側の巻き線を隣り合う相の中性点までの距離と同じ長さ確保しておき、バスリングとのフェーシング結線時に中性点側も同時に隣りの相の中性点とフェーシング結線する。これにより、中性点バスリング廃止と構造の簡素化及び軽量化が図れた。

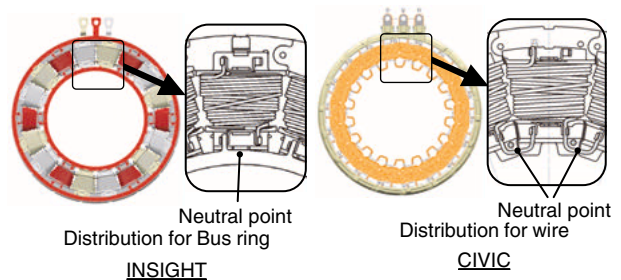


Fig. 13 Neutral point construction

6. 新機能

CIVIC Hybridでは、モータアシスト機能を搭載している価値を生かし、なめらかな走りの実現も目標の一つであった。以下、そのなめらかさ実現のため新しく適用した機能について説明する。

6.1. モータ制御による減速時振動低減

なめらかな走りの実現のため、INSIGHTでアイドル時に適用した振動低減技術である制振制御を減速時にも拡大適用した。具体的な振動低減手法としては、IMAシステムの特徴であるクランク軸に直結しているモータを利用し、減速時に発生するエンジントルクの逆位相のトルクをモータに発生させる事で振動低減を行う。この際、エンジン回転数と負荷から発生させるトルク量を決め、またクランク位置

信号を基準にエンジン回転数と負荷からトルク位相を決定する。本制御を行った場合の効果を Table 1 と Fig. 14 に示す。

Table 1 Effect of damping control

Measuring point	Effect
Floor vibration	-6dB
Engine vibration	-4dB

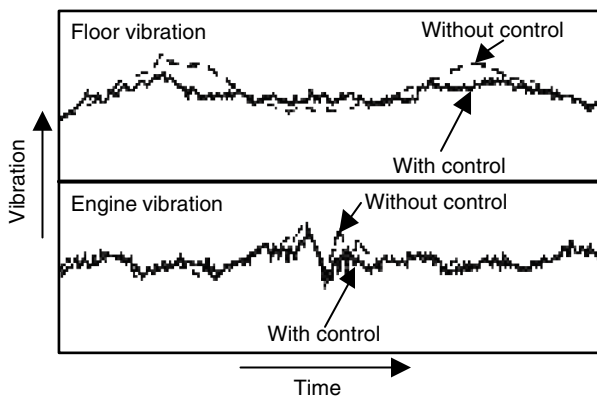


Fig. 14 Vibration in deceleration

6.2. モータ制御による車体ギクシャク感の低減

更に新しい機能として、マニュアルトランスミッション車において低速ギヤで走行中、スロットル操作による車体のギクシャク感をモータを用いる事で低減を図った。

具体的な振動低減手法としては、制振制御と同様クランク軸に直結しているモータを利用し、スロットル開度の変化により発生する車体前後振動に応じて、モータのトルクを適切なタイミングで付加する事でギクシャク感を抑制した。この際、スロットル変化の方向からアシスト又は回生であるかを決定し、エンジン回転数の変動量から付加するトルク量とタイミングを決定した。本制御を行った場合の効果を Fig. 15 に示す。

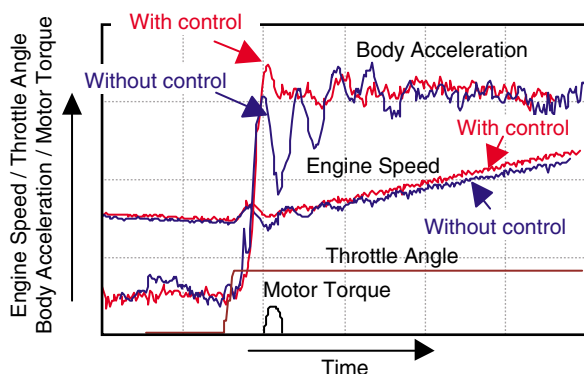


Fig. 15 Effect of Smoothing control

7. まとめ

CIVIC Hybrid用モータとしての目標性能を達成するために、トルク定数の増加と各部の損失低減を図った。具体的には、部品の機能統合による軸方向スペース確保によりステータ積厚を増加し、また新たな巻き線方法の採用により巻き線径とティース幅の拡大を行った。その結果、商品性向上のための新しい機能を発揮しつつ、モータ幅を維持したままでモータ回生トルク約30%向上と、実用域でのモータ平均効率約3%向上を実現した。

参考文献

- (1) 福尾幸一, 藤村 章, 斉藤政昭, 角田和彦, 瀧口士郎: 超低燃費ハイブリッドカー「インサイト」の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.1-8 (1999)
- (2) 脇坂岳顕, 久保田猛, 開道力: 電磁鋼板の最適選定による回転機鉄損の低減, 電気学会 回転機研究会, 99年 126 番

■ 著 者 ■



小川 博久



福田 健児