

EPS用次世代モータコントローラユニット

浅尾淑人*
金原義彦**
阿久津 悟*

Next Generation Motor Control Unit for EPS

Yoshihito Asao, Yoshihiko Kimpara, Satoru Akutsu

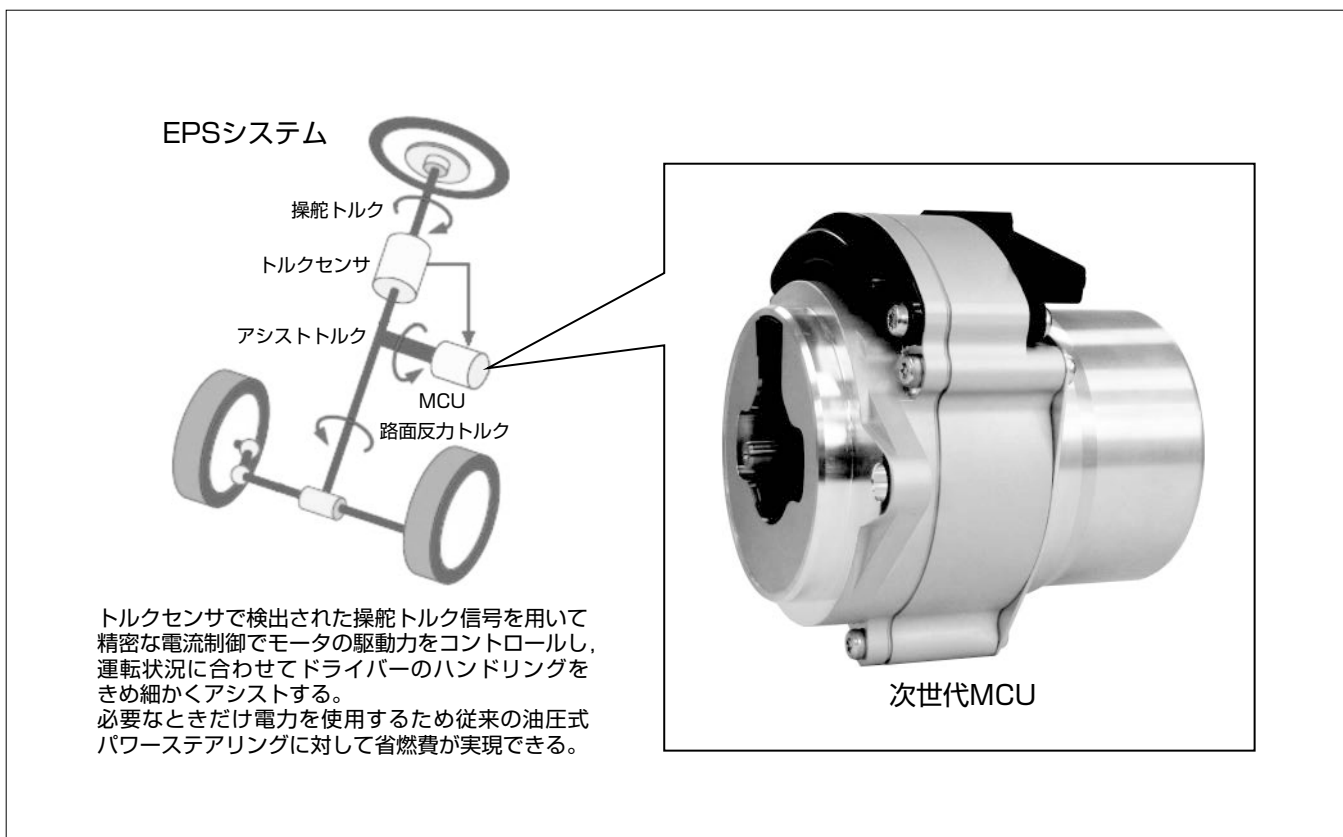
要 旨

EPS(電動パワーステアリング)はドライバーの操舵(そ
うだ)負荷トルクをモータでアシストするシステムで、従
来の油圧式パワーステアリングに対して燃費が改善できる
ため、その市場は急速に拡大している。現在、EPSは世界
で新車の約60%に搭載されており今後も大型乗用車を中心
にEPSの採用が拡大する見込みである。

三菱電機は、主に中・大型乗用車用EPS向けには、モー
タとECU(Electronic Control Unit)を一体型としたブラシ
レス方式のモータコントローラユニット(MCU)を量産し
ている。今回、優れた操舵フィーリングと、さらなる燃費
低減、搭載性向上のための小型・軽量化を目指し、MCU

構造を一新した次世代MCUを新たに開発し、量産化した。

次世代MCUは、コントローラをモータの前方(出力軸側)
に同軸上に一体配置するという、他に類を見ない構成とし
たことで、世界最小・最軽量クラスを達成した。この構成
は、コントローラ内部構造の最適設計、小型パワーモジュ
ールの開発、ボキボキコアと電磁気設計の最適化、高出力
化制御の開発によって実現したもので、同等出力の当社従
来品に比べて体積を50%、質量を30%削減という大幅な進
化を遂げている。さらに、制御アルゴリズムの革新によっ
て、優れた操舵フィーリングと操舵安定性を実現した。



次世代MCU

EPSシステムで、MCUには優れた操舵フィーリングと燃費低減、搭載性向上のため小型・軽量化が求められる。これらのニーズに応えるため、コントローラ内部構造の最適設計、小型パワーモジュールの搭載、ボキボキコアと電磁気設計の最適化、高出力化制御によって、同等出力の現行世代品に比べて体積を50%、質量を30%削減、さらに、制御アルゴリズムの工夫によって、優れた操舵フィーリングと操舵安定性を実現した。

1. ま え が き

電動パワーステアリング(EPS)はドライバーの操舵負荷トルクをモータでアシストするシステムで、従来の油圧式パワーステアリングに対して燃費が改善できるため、その市場は急速に拡大している。現在、EPSは世界で新車の約60%に搭載されており、今後も大型乗用車を中心にEPSの採用が拡大する見込みである。

当社は、主に中・大型乗用車用EPS向けには、モータ・ECUを一体型としたブラシレス方式のモータコントローラユニット(MCU)を量産している。MCUには優れた操舵フィーリングと、更なる燃費低減、搭載性向上のため、小型・軽量化が求められている。これらのニーズに応えるため、MCU内部構造の最適設計、電磁気設計の最適化、高出力化制御を駆使した次世代MCUを開発し、量産化した。

本稿では、その特長と概要について述べる。

2. 次世代MCUの特長

次世代MCUは、コントローラとモータを同軸上に配置することで、世界最小・最軽量クラスのMCUを実現した。コントローラ内部構造の最適設計、小型パワーモジュールの搭載、ポキポキコアと電磁気設計の最適化、高出力化制御によって、同等出力の当社現行世代品に比べ体積を50%、質量を30%削減することができた。さらに、制御アルゴリズムの工夫によって、優れた操舵フィーリングと操舵安定性を実現した。この章ではモータ、コントローラ、制御の各要素に採用した適用技術とパッケージングの特長を述べる。

2.1 モータの特長

次世代MCU用モータには、小型・軽量化と優れた操舵フィーリングを実現するため、ポキポキコア、10極12スロット方式、 Δ 結線方式、セグメント型磁石を採用した。次に、各要素について述べる。

2.1.1 ポキポキコア

ポキポキコアは当社の独自技術で、直線状に展開されたコアに巻線を施した後に円形状に成型するもので、高速・高密度巻線が可能、電磁気設計の自由度向上、材料歩留の向上という効果がある。次世代MCU用モータでは、現行世代品に採用していたものに更に改良を加え、コア、ロータの製造ばらつきを吸収できる構成・形状とし、操舵フィーリングに影響を与えるコギングトルクを低減した。

2.1.2 10極12スロット方式

磁石の極数とステータのスロット数の組合せを、現行世代品の8極12スロット方式に対し、10極12スロット方式とした。10極12スロット方式は、磁石の磁束の利用効率を表す指標となる基本波の巻線係数が高く、発生トルクに対する磁石量を低減できる効果がある。また、トルクリプルの

原因となる高調波(5次, 7次)の巻線係数が低く、トルクリプルを低減できる効果があり、優れた操舵フィーリングの実現に寄与している(表1)。

2.1.3 Δ 結線方式

モータの3相巻線の結線方式を、現行世代品のY結線方式に対し、 Δ 結線方式とした(図1)。 Δ 結線方式はコモンターミナル(図1(a))が不要なため、結線ターミナルの数を減らせる効果があり、MCUの小型・軽量・低コスト化に寄与している。

2.1.4 セグメント型磁石

現行世代品のリング型磁石(図2(a))に対し、セグメント型(カマボコ断面形状)磁石(図2(b))を採用した。セグメント型(カマボコ断面形状)磁石は、従来のリング型磁石では無効部分となっていた極間の部分を省くことができ、電磁気設計の最適化と合わせ、リング型磁石に比べ磁石量を約40%低減することができた。さらに、磁石形状(中央部厚さ、端部厚さ、磁石幅)を最適化することによって、トルクリプル、コギングトルクも低減することができた。

2.2 コントローラの特長

次世代MCUは、モータとコントローラを一体化して同軸上に配置することで、小型・軽量・低コストを追求した。

表1. 極, スロットの組合せと巻線係数

極数	8	8	10
スロット数	9	12	12
巻線係数(基本波)	0.9452	0.866	0.933
巻線係数(5次高調波)	0.1398	-0.866	0.067
巻線係数(7次高調波)	0.0607	0.866	-0.067

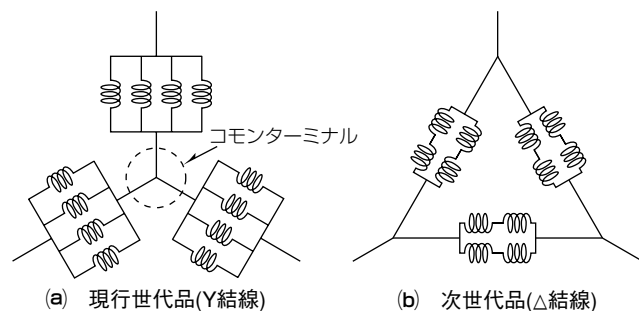


図1. モータ巻線の結線図

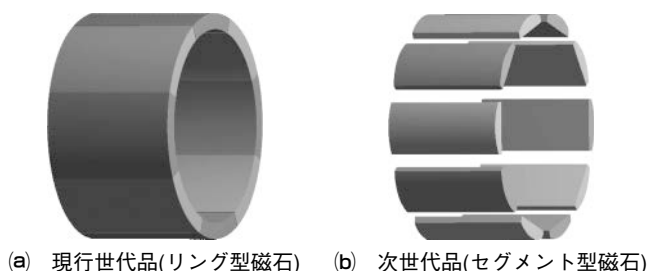


図2. 磁石の形状比較

図3に次世代MCUの内部構造を示す。ステアリングギヤハウジングへの取り付けフランジを持つヒートシンク上にコントローラの内蔵部品をコンパクトに実装している。

ヒートシンク上にはモータ駆動のためのインバータ回路を構成し、小型パワーモジュールとMCUと外部電源との遮断のためのリレーモジュールを実装している。パワーモジュールは3相各相単位で3個からなり、合計4個のパワーモジュールとリレーモジュールをヒートシンク上に同心円状に均等に配置している。また、これらモジュール間には、大型部品であるコンデンサとチョークコイル(EMC(Electro-Magnetic Compatibility)用)を同様に同心円状に配置している。これらの大型部品は、電気接続用ターミナルがインサート成型された樹脂製フレームに集約、一体に構成している。

このように、パワー及びリレーモジュール、大型部品を同心円状に配置、集約構成とすることで円筒形状のコントローラにコンパクトに納めることができ、金属基板実装している現行世代品と比較して約半分の実装面積、更には、接続配線抵抗の削減となっている。

パワーモジュールは、トランスファーモールド構造とダイレクトリード接合型(DLB)構造を採用した。これらの構成によって、配線抵抗及び配線インダクタンスの低減を図った。

また、コントローラの内蔵部品、モータのロータ、ステータまでビルトアップ構造とすることで、生産設備の自動化を容易にし製造コストの低減に寄与している。

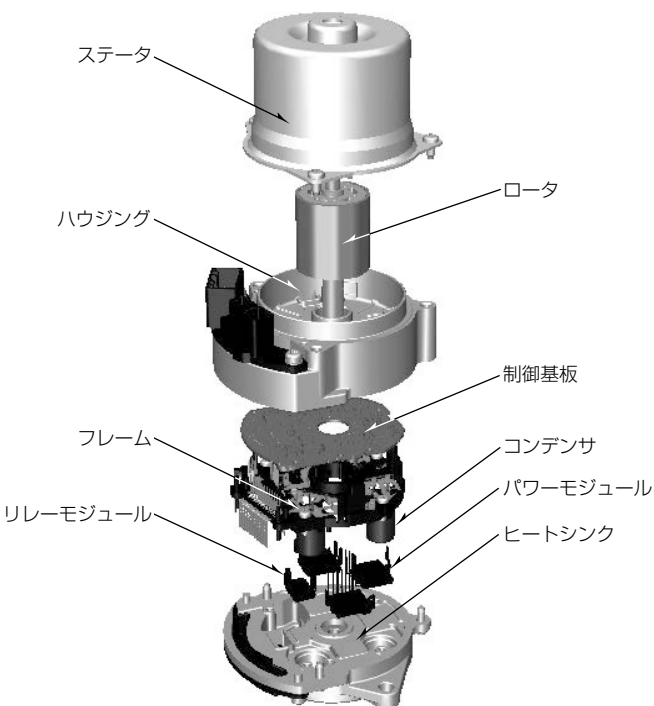


図3. 次世代MCUの内部構造

2.3 制御の特長

次世代MCUでは、優れた操舵フィーリングを実現するため、ダンピング性能を高めた安定化制御と高回転に適したモータ制御を開発した。次に、各制御について述べる。

2.3.1 安定化制御

路面からハンドルに伝わる振動を低減させるためのダンピング性能を高めた安定化制御について述べる。石畳などの路面を走行すると、ハンドルに不快な振動が伝わることがあるが、この安定化制御では、操舵トルクとモータ回転速度に基づいてモータを制御するソフトウェア・ダンパによって、このような振動の低減を実現している。モータによってハンドル振動を単純に抑えようとするとハンドル操舵が重くなり、操舵フィーリングを損ねてしまうが、この制御ではドライバーが操舵する周波数帯域は関与させず、それより高い周波数帯域の振動に対してダンピングを効かすことで、優れた操舵フィーリングを提供する。

図4は1.5mごとの凸凹路面に起因する振動が車速60km/hで発生しているときの波形である。図から分かるように、この安定化制御は振動を低減するダンピング性能を持っている。

2.3.2 モータ制御

素早いハンドル操作を実現する高回転化、すなわち、高出力化に適したモータ制御について述べる。ロータが回転すると、ロータの磁石磁束が変化し、ステータのコイルに電磁誘導によって起電力が発生する。この起電力はロータの磁石磁束の変化を妨げる電流を生じる向きに発生するので逆起電力と呼んでおり、ハンドル回転速度が高い条件ほど逆起電力が大きくなる。次世代MCUでは、ハンドル回転速度が高くなったと判断すると、ロータの磁石磁束を打ち消す電流をモータへ給電することで逆起電力を小さくする制御ロジックを採用している。

この制御のありとなしの差異を、図5に示す。市街地走行や交差点走行といった通常の操舵では制御の差異は現れないが、縦列駐車や回避走行時といったハンドル回転速度が高い条件では、従来制御よりも大きなアシスト力を発生することで素早い操舵を実現している。

2.4 パッケージングの特長

次世代MCUは、コントローラとモータを同軸上に配置し、内蔵要素部品の小型化、最適配置、接続部材の合理化

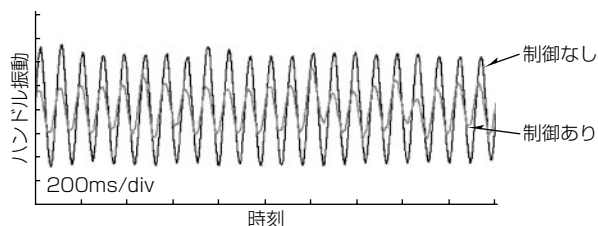


図4. 凸凹路面走行時のハンドル振動波形

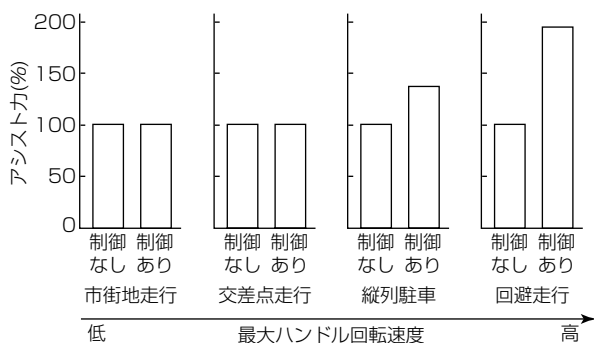


図 5. 最大ハンドル回転速度とアシスト力(制御なしを基準)

表 2. 次世代MCUの主な仕様

項目	仕様
コントローラ部外径	φ93mm(コネクタ部除く)
モータ部外径	φ80mm
全長	100~140mm
質量	1.8~3.3kg
定格トルク	2.2~6.8N・m

を図ることで、同等出力の現行世代品に比べて、体積で50%、質量で30%の削減が可能となった。車両における搭載性の向上と燃費低減に大きく貢献する。次世代MCUの主な仕様を表2に、同等出力の現行世代品と次世代品との外観比較を図6に示す。

現行世代MCUでは、体格が大きかったため、顧客要求である車両レイアウトやコネクタ仕様に応じて、コントローラ外形形状を向け先別に個別に専用設計していた。次世代MCUではコネクタ部(図6(b))をモジュール化し、コネクタ部のみを要求に応じて変更できる構造とした。これによって、新規及び専用設計部品が削減され、設計工数の削減や顧客への金型負担軽減に貢献できた。

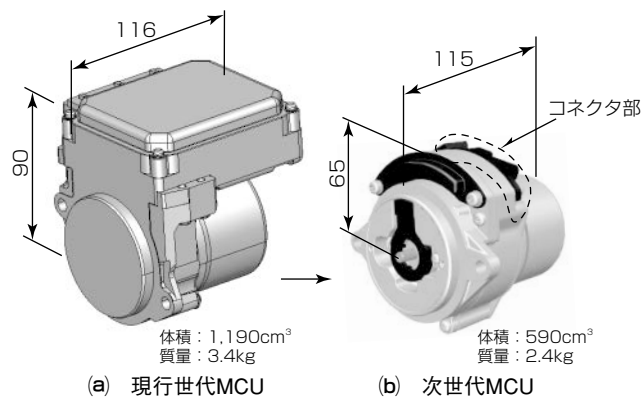


図 6. MCUの外観比較

3. むすび

次世代MCUは、コントローラとモータを同軸上に配置することで、世界最小・最軽量クラスのMCUを実現した。コントローラ内部構造の最適設計、小型パワーモジュールの搭載、ボキボキコアと電磁気設計の最適化、高出力化制御によって、同等出力の当社従来品に比べて体積を50%、質量を30%削減した。さらに、制御アルゴリズムの工夫によって、優れた操舵フィーリングと操舵安定性を実現した。

この次世代MCUを自動車メーカー、ステアリングメーカーへ提供することで自動車の低燃費化に貢献していく。

参考文献

- (1) 児玉誠樹, ほか: ブラシレスEPSシステム, 三菱電機技報, 78, No.9, 573~576 (2004)