

電動車駆動用標準モータの開発

Development of Standard Motor for Green Vehicles

濱野 宏 齋藤 泰行 菊地 聡
Hamano Hiroshi Saito Yasuyuki Kikuchi Satoshi

地球環境問題を背景として、自動車分野では車両駆動の電動化へのニーズが高まりつつある。しかし、電動車にはHEV、EV、PHEV用など方式が複数あり、電動車駆動用モータに要求される出力やトルク、モータ寸法などの仕様もさまざまである。これらの個々の要求に合わせ、モータ開発を行うのは開発工数・費用・期間が多大になってしまう。日立オートモティブシステムズ株式会社は、この課題に対応し、RR-rotor方式など独自技術を考案しながら、多様な案件に共通して対応できる電動車駆動用標準モータを開発中である。

1. はじめに

昨今の地球環境問題に対応するため自動車の燃費・排出ガス規制が強化される中、車両駆動の電動化が注目されている。日立グループはこれまで、車両駆動用モータとして、小型・軽量、高出力、高効率を達成するため永久磁石埋め込み式のIPM (Interior Permanent Magnet) 同期電動機を採用し、出力トルク／体格比の大きいモータの開発に取り組んできた。また、日立グループが独自開発した高機能・高速な電磁界シミュレータLUVENS (Large-scale Universal Vector Electromagnetic-fields Numerical Simulator) を駆使したモータコア形状や、マグネット配置など最適化設計のデジタルエンジニアリング技術、および長年蓄積された絶縁技術などのノウハウにより、高性能化と開発のスピードアップを実現してきた。しかし、電動車駆動用モータに対する顧客ニーズは、HEV (Hybrid Electric Vehicle: ハイブリッド自動車)、EV (Electric Vehicle: 電気自動車)、PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle: プラグインハイブリッド自動車) 用など複数方式にわたり、出力やトルク、モータ寸法など要求仕様はさまざまである。これらすべて個々に開発対応すると、費用・工数が膨大となり、開発スピードも遅くなるため、日立オートモティブシステムズ株式会社は、複数の仕様に共通に適用することができる電動車駆動

用標準モータの開発を進めている。

ここでは、開発中の電動車駆動用標準モータの概要について述べる。

2. 電動車駆動用標準モータの概要

標準モータ構想のコンセプトは、小型・軽量、高出力、高効率、低騒音・低振動などを実現しながらも、HEV、EV、PHEVなど複数の電動車方式、およびさまざまな車格に共通で適用可能なモータ仕様を設定することで、開発工数低減、構成部品の共通化、生産設備の共通化、モノづくりの共通化を図ることである。これにより、開発効率を向上させつつ、低価格なモータを開発することをめざしている。このコンセプトを可能にするためには、さまざまな車格で共通的に車両レイアウトが可能なモータ寸法、広範囲な要求出力をカバーできる出力特性、電動車方式の特性に応じた時間定格など、それぞれの用途に対応できるバリエーションの設定が必要となってくる。これらの対応方法の考え方を以下に述べる。

2.1 標準モータのステータ巻線方式

標準モータのステータ巻線方式は、小型・高トルク密度化を図るため、電線に角線を用いた波巻方式とした。角線を使用することにより、従来の丸線分布巻方式に比べて占積率(導体面積／スロット面積)を約20%、モータの出力トルク密度(出力トルク／ステータコア $D^2 \times L$)を約15%それぞれ向上させることが可能である(図1参照)。

2.2 モータ外径寸法の選定

一口に電動車両と言っても、モータレイアウトは方式によってさまざまである。標準モータがターゲットとする代表的なモータレイアウトとして、次の2種類に着目した。

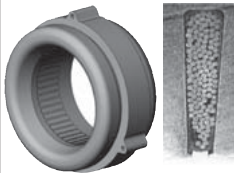
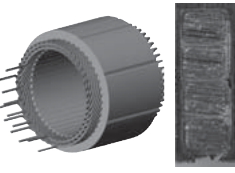
	(従来)丸線分布巻方式	角線波巻方式
スロット断面		
トルク密度	60~70(Nm/L)	70~80(Nm/L)
占積率	40~45(%)	60~65(%)

図1 | 標準モータのステータ巻線

高占積率、小型・高トルク、高効率が可能な角線を用いた波巻を採用した。

(1) 主にEV用として減速機と組み合わせて用いられることを想定した長尺円筒タイプ

(2) HEV用としてエンジンとトランスミッションとの間に挟み込みで配置されたり、トランスミッションの中にビルトインされることを想定した扁平円筒タイプ

まず、長尺円筒タイプのEV用モータ外径寸法選定の考え方について述べる。EV用モータは一般的に減速機と組み合わせられ、エンジン車のエンジンおよびトランスミッションの代わりとしてボンネット内に配置される。また、モータ冷却方式としては、モータケースにウォータージャケットを設けて冷却水を循環させる水冷方式が採用される場合が多い。これらの条件と最低地上高との関係からステータコア外径寸法を200 mmとした。

次に、HEV用としての扁平円筒タイプのモータ外径寸法については、モータレイアウトはエンジンとトランスミッションとの間に挟み込み、あるいはトランスミッションケースの中に配置されることが想定されるため、トランスミッションの外径寸法を考慮する必要がある。さらにモータ冷却方式は一般的にトランスミッション油で冷却されるが、水冷方式への対応も考えモータ外周にウォータージャケットを設けられることも考慮して、ステータコア外径寸法を245 mmとした。

以上のように、ステータコア外径寸法を200 mmと245 mmの2種類に絞って共通化することで、開発効率の向上を図ることができる(図2参照)。

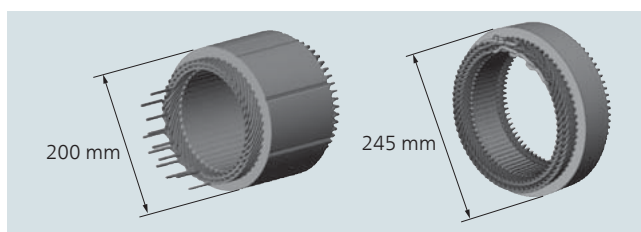


図2 | 標準モータの寸法

ステータコア外径寸法は200 mmと245 mmの2種類を設定した。

3. モータ仕様および特長

車両駆動用モータでは、広くIPM同期電動機が採用され、近年のモータ制御技術の向上により滑らかな走りが実現されている。しかし、モータ自体が発生するトルクには、その構造上からトルクリプル(トルク脈動)があるため、低速運転時の脈動や高速運転時の騒音・振動の要因の1つとなっている。この要因を低減するため、ロータおよびステータのそれぞれに採用した独自技術について以下に述べる。

3.1 RR-rotor

IPMモータのロータにおいてトルクリプルを小さくするには、一般的にマグネットを分割して軸方向にロータコア部分をオフセットスキューする方法が知られている(図3参照)。この方法では磁石の使用個数が増えるため磁石加工費が増加し、さらにロータ組立作業が悪化するなどコスト高の要因となる。そこでスキューを行うことなくトルクリプルを低減できるRR(Ripple Reduction)-rotor方式を考案した。

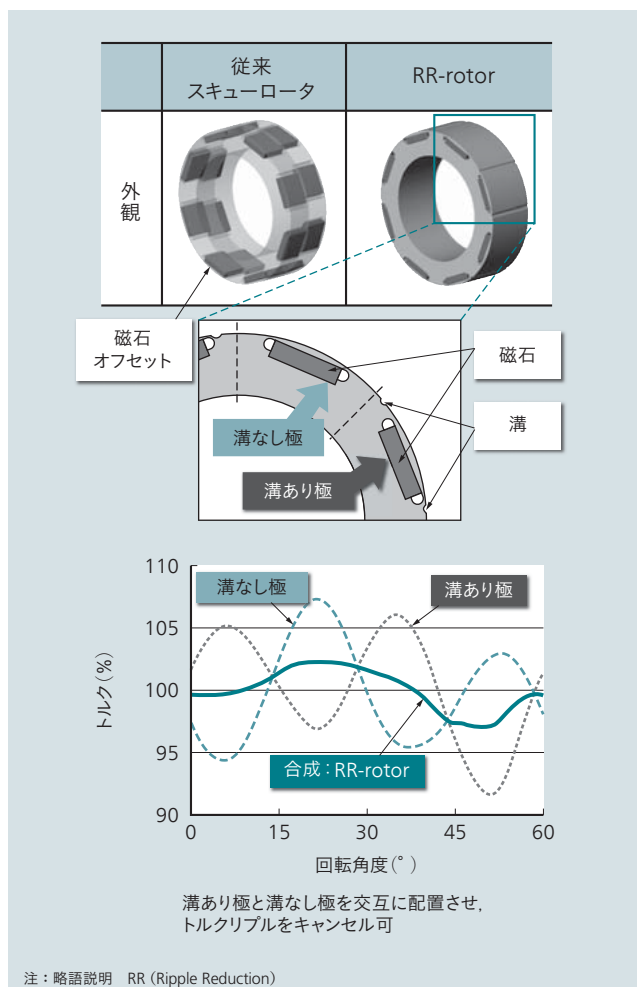
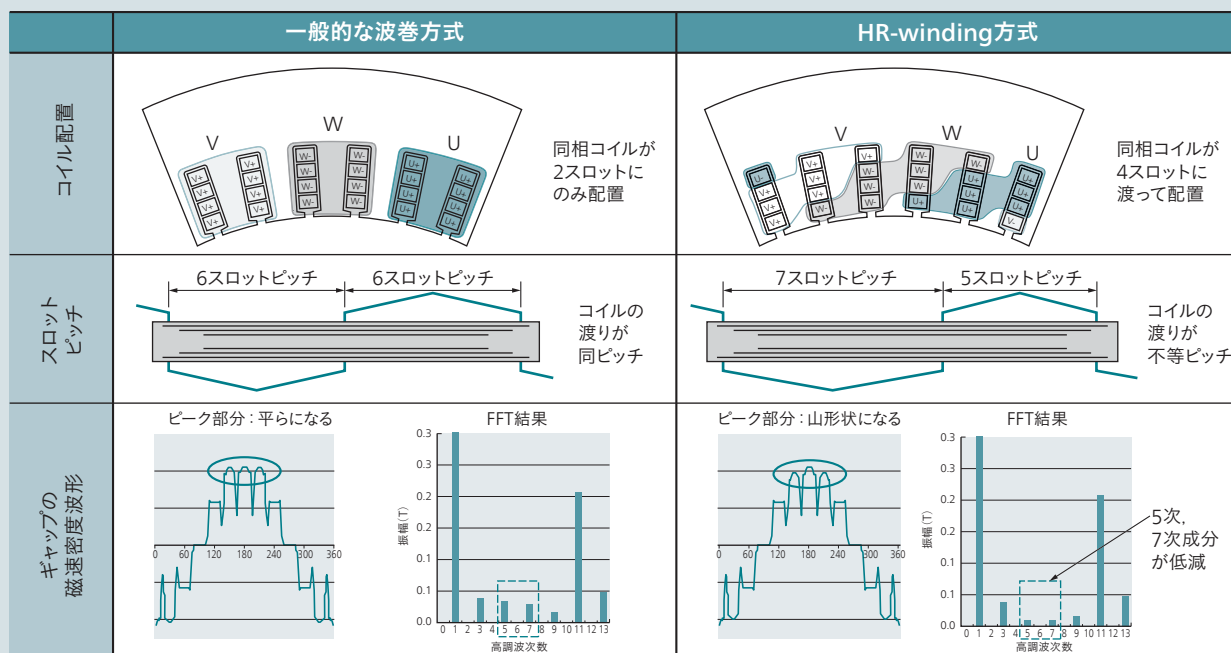


図3 | RR-rotor

ロータの外周に1極置きに溝を設けることで、磁石を軸方向に分割することなく、トルクリプルを低減できる。



注：略語説明 FFT (Fast Fourier Transform), HR (Harmonic Reduction)

図4 | HR-winding

起磁力、誘起電圧の高調波成分を低減することにより、低トルクリプル、低騒音化が可能となる。

トルクリプルはステータ巻線による磁束と磁石による磁束との相互作用、およびステータスロット形状やロータ極形状の影響によって磁束の粗密が分布することで出力トルクに脈動が発生する現象である。このトルクリプル波形に、これとは逆位相となるトルク波形を掛け合わせることができればトルクリプルの相殺が可能となる。

この逆位相のトルク波形を発生させる手段として、ロータの形状に手を加え構造的に磁束の流れを変化させ、ステータに鎖交する磁束の流れを変えるという手法をとった。具体的には、同図に示すようにロータ表面のマグネット両脇部に、ロータ磁極の1極置きに溝を設けることで、溝あり極が発生するトルクリプル波形を、溝なし極が発生するトルクリプル波形に対して位相を反転させられるようにした。この結果、溝なし極が発生するトルク波形と、溝あり極が発生するトルク波形とが合成相殺されて、トルクリプルの低減が可能となる¹⁾。

3.2 HR-winding

ステータ巻線方式において、静音化、低トルクリプル化を図る技術として、HR (Harmonic Reduction) -winding方式を考案した。モータ電磁音、およびトルクのリプル低減のためには、起磁力と誘起電圧の高調波成分を低減することが重要である。これらを達成するための方策として、新たな巻線方式を考案した(図4参照)。

従来の巻線方式は、各コイルのスロットピッチが同じも

のを使用し、ステータ断面において1相当りのコイル配置は2スロットに集中するようになっていた。これに対し、今回考案したHR-windingでは、7スロットピッチと5スロットピッチのコイルを使用することにより、1相当りのコイル配置を4スロットに渡って配置するようにし、コイルが発生する磁束を分散させる。これにより、ステータ内径とロータ外径間のギャップにおける磁束波形の先端部分が山形状となり、全体波形をより正弦波に近づけることで、5次、7次成分を低減し高調波成分を低減するようにした。

3.3 RR-rotorおよびHR-windingの効果

RR-rotorおよびHR-windingの効果を確認するため、最大トルク180 Nmのモータを例に、磁界シミュレーションによってトルクリプルを計算した結果を図5に示す。

グラフは横軸にモータ回転速度、縦軸にトルクリプル値を示す。HR-windingを適用することで適用前に比べてトルクリプルを最大51%低減でき、これに加えてRR-rotorを適用することで、HR-windingだけを適用したものに対して、トルクリプルを最大85%低減できる見込みを得た。また、トルク波形のFFT (Fast Fourier Transform) 解析結果を見ると、それぞれ効果のある回転次数成分が異なっており、HR-windingは回転24次成分、RR-rotorは回転48次成分を低減できることが分かる。

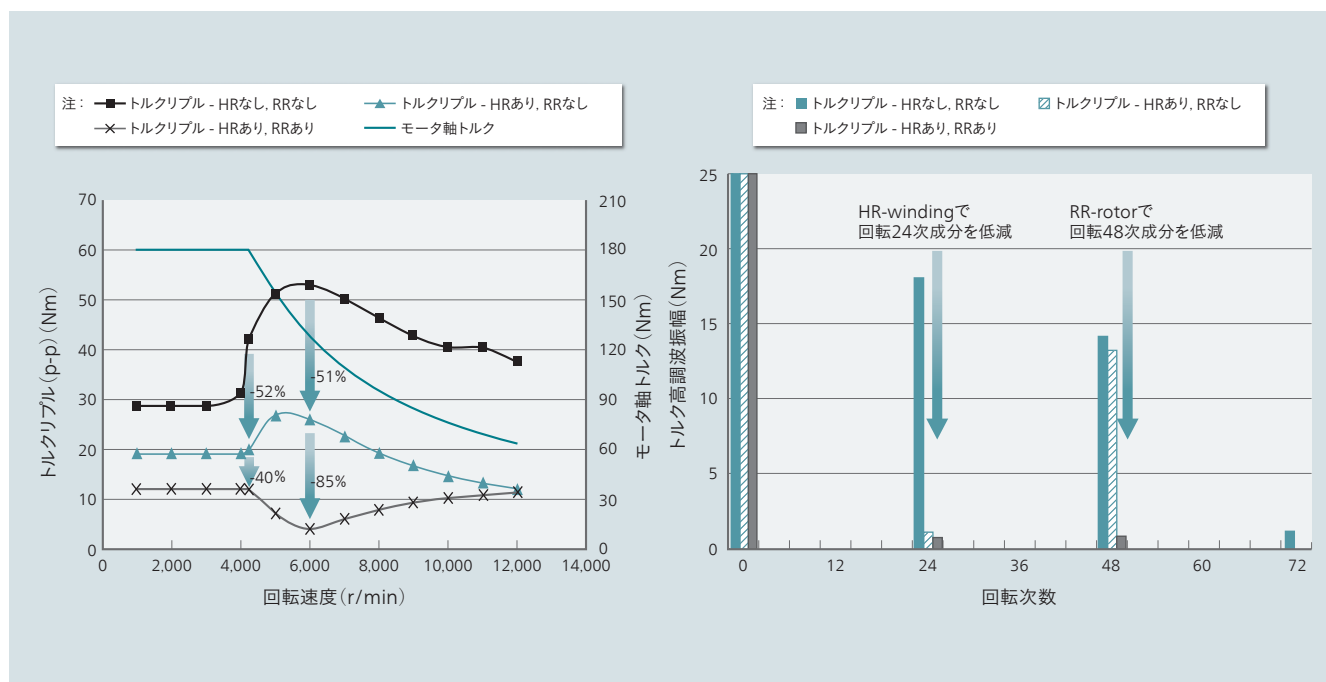


図5 | トルクリップル低減の効果

最大トルク180 Nmのモータを例に、HR-windingとRR-rotorの効果について、磁界シミュレーションを用いて確認した。HR-windingを適用することでトルクリプルを51%低減でき、RR-rotorを適用することでトルクリプルを85%低減することができる。なお、この結果は、正弦波電流を用いた計算値である。

4. 標準モータでの出力調整方法

標準モータとして、ステータコア外径寸法を200 mmおよび245 mmの2種類を設定したが、顧客要求のモータ性能はさまざまであり、このニーズに対応するため下記の2種類の方策によってモータ性能を調整する計画である(図6参照)。

4.1 積厚変更によるトルク調整

モータ設計開発にあたっては、顧客要求に合わせて新規にコア形状からの磁気回路設計(モータ断面形状の設計)を行うのは、かなりの開発工数を必要とする。しかし、モータ断面の磁気回路設計が完了すれば、モータ軸方向の寸法(コア積厚寸法)を変更した性能計算をすることは、それほど難しいことではない。また、生産設備についても角線波巻を採用することで、モータ断面形状の変更がなく軸方向の寸法変更だけであれば、従来の丸線分布巻よりも比較的容易に生産対応も可能となる。

以上により、コア断面形状を変更せずモータトルクなどの性能を調整する手段として、図6上段に示すように軸方向のコア積厚を調整する計画とした。

4.2 巻線の結線変更によるトルク調整

モータに求められる出力範囲、要求される時間定格は、電動車の種類、組み合わせられる減速機のギヤ比により異なってくる。EV用では、モータだけでの走行となるため、広範囲な連続運転可能な領域が要求される。一方で、

HEV用ではエンジンと協調したトルクアシストを行うため、短時間で高トルクを発生させる使われ方となる。これらの要求に対応するため、図6下段に示すように巻線構造は同一としながら、ステータ結線の接続を変更することとした。

EV用では、減速機ギヤ比に合わせた低トルク高回転型のモータ出力特性とするため、巻線回路を2並列となるように端末接続する。これにより使用頻度の高い中低トルク走行領域で広範囲の連続運転が可能となるようにする。

HEV用では、高トルク低回転型のモータ出力特性が要求されるため、巻線回路を2直列となるように接続して巻

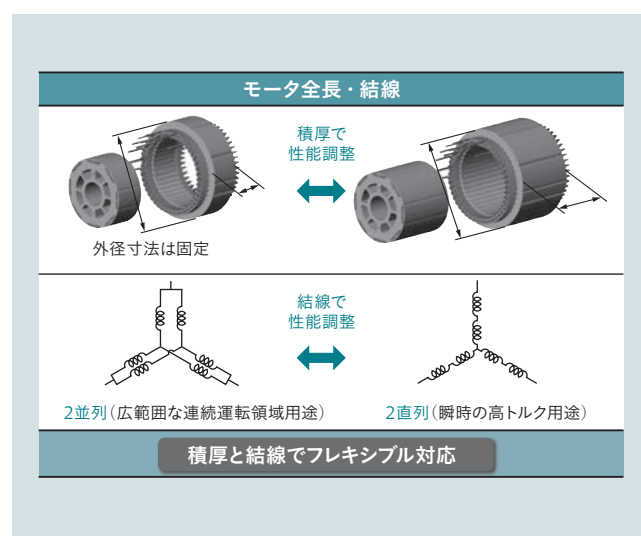


図6 | ステータのバリエーション

積厚変更と結線変更で性能調整する。



図7 | 日立オートモティブシステムズ標準モータ

ステータコア外径寸法を標準化し、小型高出力・高効率および低騒音なモータの開発を推進中である。

数を増やし、高トルクの発生が可能にする。通電時の温度上昇が大きくなり、運転可能時間も短時間となってしまうが、HEVでの発進時などの短時間トルクアシスト用途には十分に対応可能と考える。

以上の考え方により、コアや磁石、電線、絶縁紙などの部品の共用化、生産設備の標準化、モノづくりの標準化も可能となる。

5. おわりに

現在、独自技術を盛り込んだ電動車駆動用標準モータを開発中である（図7参照）。昨今の環境規制、燃費規制の動向は流動的だが、電動車両のニーズは拡大していくと思われ、ここで述べた次世代標準モータの技術は車両電動化のニーズに応えるキーテクノロジーになると考える。

参考文献

- 1) 吉原，外：ハイブリッド電気自動車用パワートレインの電動化技術開発，日立評論，91，10，768～771（2009.10）

執筆者紹介



濱野 宏

1987年日立製作所入社，日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 パワートレイン設計本部 EP機器設計部 所属
現在，EV/HEVモータの開発，設計に従事。
自動車技術会会員



齋藤 泰行

2003年日立製作所入社，日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 パワートレイン設計本部 EP機器設計部 所属
現在，EV/HEVモータの開発，設計に従事。
自動車技術会会員



菊地 聡

1989年日立製作所入社，日立研究所 モータシステム研究部 所属
現在，自動車用トラクションモータの高効率化・小型化に関する研究に従事
電気学会会員，日本冷凍空調学会会員