

電気自動車用小型・軽量・高出力 IPM モータの開発

Development of Small Size, Light Weight and High Power IPM Motor for Electric Vehicle

西尾 章 平野 雅弘 加藤 義樹
入江 隆之 馬場 功



この度、当社では電気自動車用小型・軽量・高出力IPMモータとインバータを開発した。本報では、電気自動車、ハイブリッド自動車のシステム構成、当社で開発した電気自動車用IPMモータ及びインバータの小型・軽量・高出力化技術について述べる。モータは磁石配置の工夫、ロータ極数/ステータスロット数の組合せの最適化、集中巻の採用等により高電流密度、高トルク定数、高力率設計とすることで出力/体積比が従来の約2.5倍の高出力化を実現した。インバータは、水冷構造の最適化や電源回路と制御回路を1枚の基板にすることにより小型・軽量化を実現した。

1. はじめに

近年、資源の枯渇、二酸化炭素排出量の増加等、環境問題の観点から電気自動車（EV）、ハイブリッド自動車（HEV）、燃料電池自動車（FCEV）等の開発が活発になっている。これらの自動車の駆動用モータとしては、燃費改善、室内空間の確保、低排出ガス等のため小型・軽量・高出力なモータが求められ、特に低速回転域から高速回転域にわたって、高出力・高効率な特性が求められる。

最近では希土類系磁石の高性能化、低価格化が進んでいることもあり高速回転に適し、誘導モータに比べ小型、軽量、高効率化が可能な埋込磁石同期モータ（IPMモータ:Interior Permanent Magnet）が注目されている。

この度、当社では従来のサーボモータ・アンプ開発での技術の蓄積をいかし、小型・軽量・高出力な電気自動車用

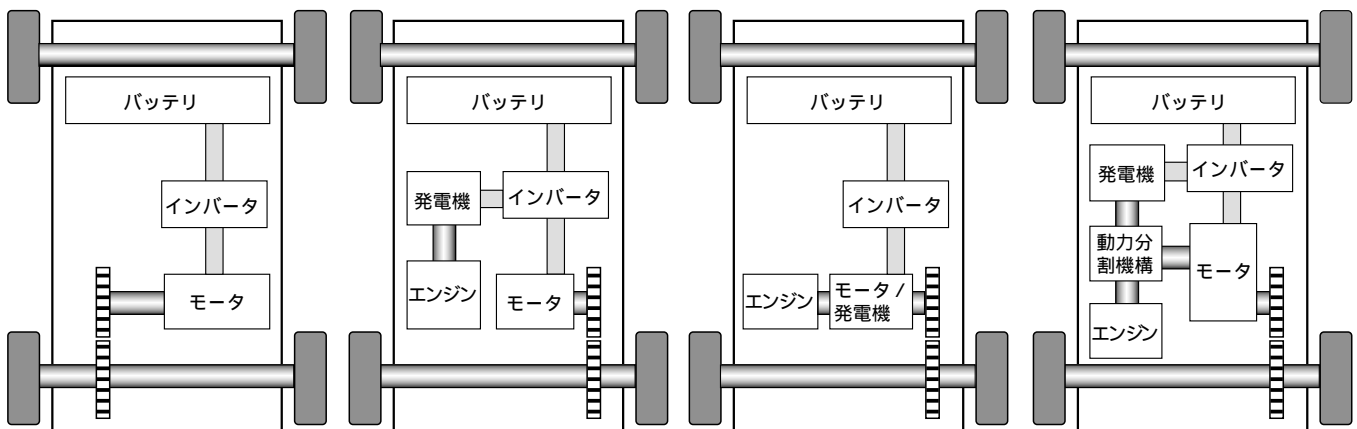
IPMモータとインバータを開発した。本報では、電気自動車、ハイブリッド自動車のシステム構成、当社で開発した電気自動車用IPMモータ及びインバータの小型・軽量・高出力化技術、製品仕様について述べる。

2. システム構成概要

電気自動車、ハイブリッド自動車（シリーズ方式、パラレル方式、シリーズ・パラレル方式）のシステム構成を図1に示す。

電気自動車はモータを動力源とし、バッテリーからの電力のみで駆動する。減速、下坂時にはモータは発電機として働き電力をバッテリーに回生する。燃料電池自動車はこのシステムのバッテリーが燃料電池に置き換わったものである。

ハイブリッド自動車はエンジンとモータの2つを動力源とする。このハイブリッド自動車には主に3種類ある。



電気自動車

ハイブリッド自動車
(シリーズ方式)

ハイブリッド自動車
(パラレル方式)

ハイブリッド自動車
(シリーズ・パラレル方式)

図1 電気自動車、ハイブリッド自動車のシステム構成

電気自動車、ハイブリッド自動車は主に4つのシステムに分類される。

シリーズ方式はエンジンで発電機を回し、発電された電力でモータを駆動し走行するものである。パラレル方式はエンジンが走行の主体であり、場合によりバッテリーを充電する動力源として使用され、発進や加速時にモータが作動し駆動力を補助するものである。シリーズ・パラレル方式はシリーズ方式とパラレル方式を合わせた方式でモータと発電機を両方持ち、低速時はモータで走行し、ある速度以上になるとエンジンが回転し始め、駆動負荷が軽くなると発電しながら走行するものである。

これらのシステムにおいて、モータ・インバータはエンジンの代わり、もしくは補助する役割を有するため、燃費向上、低排出ガスの効果を高めるため小型・軽量・高効率が求められる。

ハイブリッド自動車の燃費改善効果について図2⁽¹⁾に示す。この図から分かるように高出力モータほど燃費改善効果が高くなっている。ハイブリッド自動車はエンジンとモータの両方を必要とするため、モータ・インバータの配置スペースは限られている。このためモータ・インバータの小型・軽量・高出力化が不可欠である。

3. 小型・軽量・高出力化技術

今回開発した、電気自動車用モータ・インバータの一例を図3に示す。

3.1 モータ

電気自動車用モータは高速領域までの運転を求められる。従来のサーボモータのような表面磁石構造モータ（SPMモ

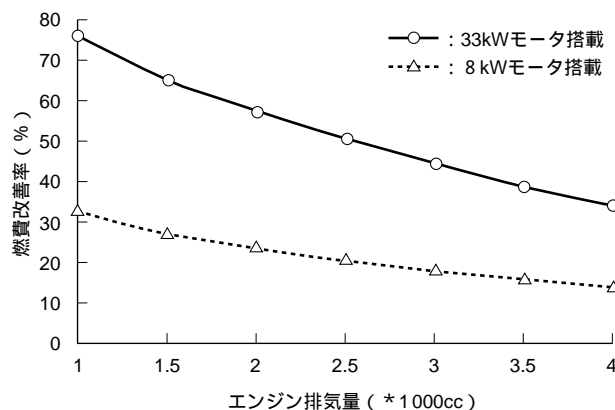


図2 走行距離/リットル⁽¹⁾ 高出力なモータほど燃費改善効果が高くなっている。

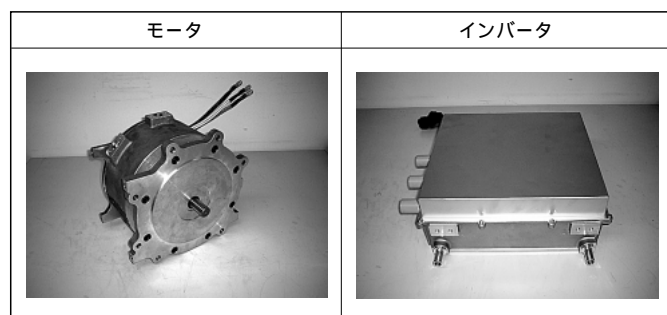


図3 電気自動車用モータ及びインバータ 開発した電気自動車用モータ及びインバータの一例を示す。

ータ)では磁石を表面に貼り付ける構造のため高速領域での遠心力による磁石の飛散及び弱め界磁制御による減磁耐力が問題となる。そこで、磁石を内部に埋め込む構造のIPMモータを採用した。IPMモータは弱め界磁制御を用いることで高速領域まで高い出力を維持することができるという利点も有している。

モータを小型・軽量・高出力にするためには、出力に対するモータ体積比であるエネルギー密度を大きくとることが必要となる。

このためには以下の3つのポイントが挙げられる。

(1) 高電流密度

従来のIPMモータでは電流を多く流すと磁気飽和し、インダクタンスが大きく変化するため電流を多く流せなかった。また、弱め界磁制御時に電流進み角が大きくなるとインダクタンスが急に大きくなる特性がある(図4)。これらの特性は式(1)から分かるように高速回転時にモータ端子電圧の上昇を招く。インバータの出力可能な電圧はバッテリー電圧から上限があるため、モータ端子電圧がこの上限値を超えた場合電流を多く流すことができなくなる。

$$V_a = \sqrt{(R_a i_d - L_q i_q)^2 + (R_a i_q + L_d i_d + \dot{\phi}_a)^2} \quad (1)$$

ここで、

V_a : モータ端子電圧 [Vrms]

R_a : モータ巻線抵抗 [Ω]

i_d, i_q : d, q軸電流 [A]

L_d, L_q : d, q軸インダクタンス [H]

ω : 電気角速度 [rad/sec]

ϕ_a : 永久磁石による電機子鎖交磁束 [Wb]

しかし、当社モータではマグネットの配置を工夫することにより、磁気飽和の限界を高くすると同時に、インダクタンスを小さくしている。また、高速回転領域での弱め界磁制御時に電流進み角が大きくなる場合においてもインダクタンスの変化を小さく抑えてモータ端子電圧の上昇を抑えている。これにより高電流密度を実現している。

(2) 高トルク定数

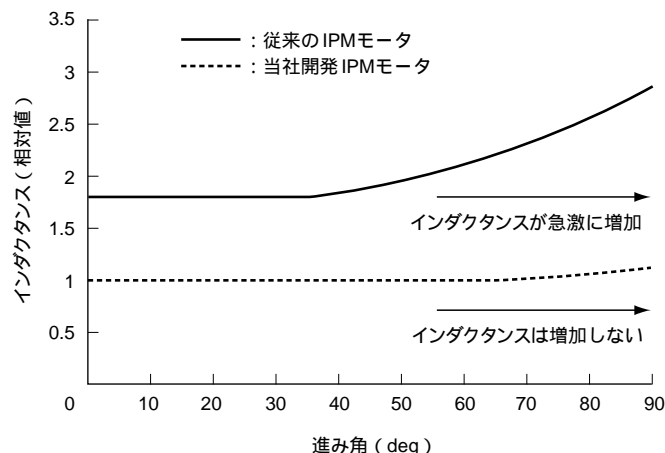


図4 電機子インダクタンスと電流進み角 当社開発IPMモータでは電流進み角が増加しても電機子インダクタンスはほとんど増加しない。

式(2)，式(3)から分かるように従来，エネルギー密度を大きくするためにモータのトルク定数（永久磁石による電機子鎖交磁束）を大きくすることは誘起電圧が高くなるため敬遠されてきた．しかし，弱め界磁制御を積極的に活用することにより，トルク定数を大きくし，高出力モータを実現することができる．

$$T = P_n \left\{ a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right\} \quad (2)$$

$$a = \sqrt{3} K_e^* N \quad (3)$$

ここで，

T ：トルク [Nm]

P_n ：モータ極対数

K_e ：相誘起電圧定数 [Vrms/rpm]

N ：回転速度 [rpm]

ロータ外径と巻線方式，その他電気的特性を同一とした場合，トルク定数を大きくするためには極数を大きくすることが必要となる．

また，ステータ外径，積厚，極数を同一とした場合，トルク定数は巻線のターン数に比例する．ターン数を増やすには巻線溝であるスロット断面積を大きくとる必要があり，スロット数が同じ場合1本のスロット歯部断面積が小さいことがその条件となる．当社ではこれらのことを考慮しトルク定数を大きくするため，極数とスロット数の組合わせの最適化を行った．

スロット数と極数が最適化されたモータでは，スロットの開口部広さを調節することにより基本波磁束に対する巻線係数を1に近くかつ高周波磁束に対する巻線係数を小さく

くできるため高トルク定数を実現できる．

当社ではこのことを考慮しスロット開口部広さの最適化を行い高トルク定数を実現している．

(3) 高力率

従来のIPMモータではq軸インダクタンスが大きく，電機子反作用の影響が大きいため，発生トルクが大きいときには力率が低下する．しかし，当社モータはロータに埋め込まれた磁石とロータ表面との距離を最適化し，q軸インダクタンスを小さくすることによって発生トルクが大きい時でも高力率を実現している．

その他，巻線方式は省スロットでかつ巻線作業を自動機で行える集中巻を採用することとした．また，従来サーボモータの冷却は強制空冷であったが，水冷とすることにより小型化を実現している．

従来のサーボモータとの比較を表1に示す．上記の技術により従来サーボモータと比べ，出力/体積比が約2.5倍となった．

3.2 インバータ

電気自動車用インバータと従来サーボアンプの主要諸元を表2に，インバータの内部構成を図5に示す．従来サーボアンプとの大きな違いは，上位コントローラとの通信に国際規格であるCANを採用していること，電流制御では弱め界磁制御を行っていることである．

従来のサーボアンプはパワーモジュールの冷却は強制空冷であったが，今回開発したインバータは小型化のため水冷となっている．水冷構造についても冷却フィンの最適化を行い小型で効率の良い設計となっている．

また，エンジンルーム内に設置するため全閉・防水構造としている．その他，電源回路と制御回路を1枚の基板にすることにより，省配線，小型化を実施し，組立て時の作業効率も高めている．

上記の技術により同出力の従来サーボアンプと比べ，体積が1/3，重量も1/2となった．

表1 モータ主要諸元比較

| No. | 項目 | 電気自動車モータ(例) | 従来サーボモータ |
|-----|----------------------|-------------|----------|
| 1 | 定格出力 (kW) | 40 | 22 |
| 2 | 定格入力電流 (Arms) | 133 | 120 |
| 3 | 最大出力 (kW) | 75 | 47 |
| 4 | 最大入力電流 (Arms) | 340 | 310 |
| 5 | 体積 (m ³) | 0.0141 | 0.0242 |
| 6 | 質量 (kg) | 58 | 76 |
| 7 | 冷却方式 | 水冷 | 強制空冷 |
| 8 | 構造 | 防水仕様 | - |

表2 インバータ主要諸元比較

| No. | 項目 | 電気自動車インバータ | 従来サーボモータ |
|-----|----------------------|------------|--------------|
| 1 | 定格出力電流 (Arms) | 133 | 138 |
| 2 | 最大出力電流 (Arms) | 340 | 345 |
| 3 | 電流制御方式 | 正弦波PWM制御 | 正弦波PWM制御 |
| 4 | 入力電源 (V) | DC 288 | AC 200 ~ 220 |
| 5 | 構造 | 全閉・水冷式 | 強制空冷式 |
| 6 | 重量 (kg) | 18 | 40 |
| 7 | 体積 (m ³) | 0.01734 | 0.05337 |

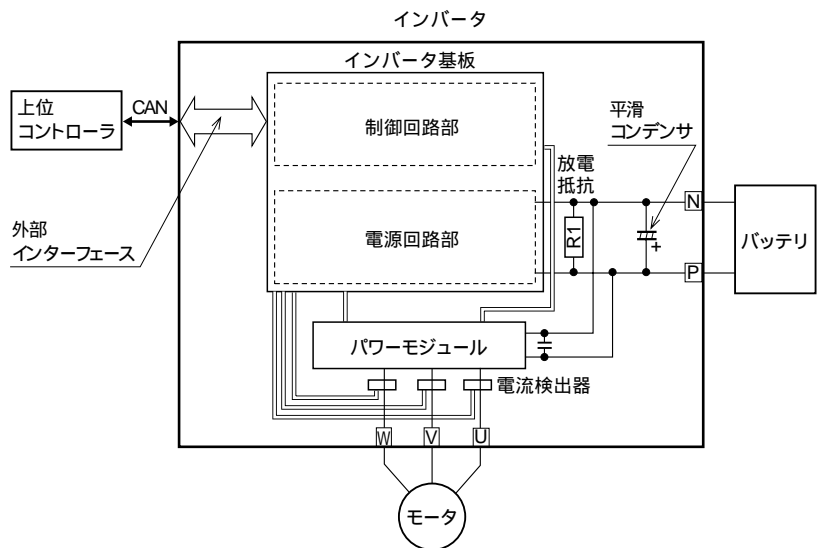


図5 インバータのシステム構成 上位コントローラとの通信には国際規格であるCANを採用している．

表3 既開発品電気自動車用、ハイブリッド自動車用モータ主要緒元

| 項目 | タイプ1 | タイプ2 | タイプ3 | タイプ4 |
|---------------------|--------|--------|------------|------------|
| 最大出力 (kW) | 100 | 33 | 13 | 35 |
| 最大トルク (Nm) | 250 | 82 | 90 | 197 |
| 最高回転数 (rpm) | 5750 | 6000 | 6000 | 3750 |
| ケース直径/ステータ直径*1 (mm) | 320 | 280 | 238 | 330 |
| ケース長/ステータ直径*1 (mm) | 290 | 189 | 35 | 60 |
| 冷却方式 | 水冷 | 水冷 | 水冷 | 水冷 |
| 電源電圧 (V) | 380 | 240 | 42 | 288 |
| 適用車種 | 電気自動車 | ハイブリッド | パラレルハイブリッド | パラレルハイブリッド |
| タイプ*2 | モータタイプ | モータタイプ | ビルドインタイプ | ビルドインタイプ |

*1：モータタイプの場合は、ケース直径、ケース直を示し、ビルドインタイプの場合はステータ直径、ステータ長を示す
*2：モータタイプとは通常のモータケースのタイプ。ビルドインタイプはエンジンケースに組み込まれたタイプ

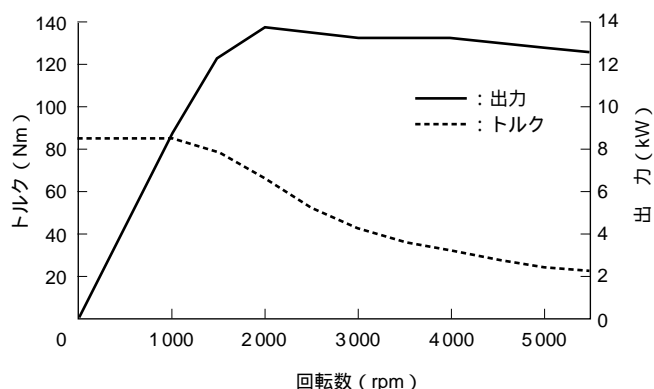


図6 速度・トルク・出力特性(タイプ3) 高速領域まで高い出力を維持していることが分かる。

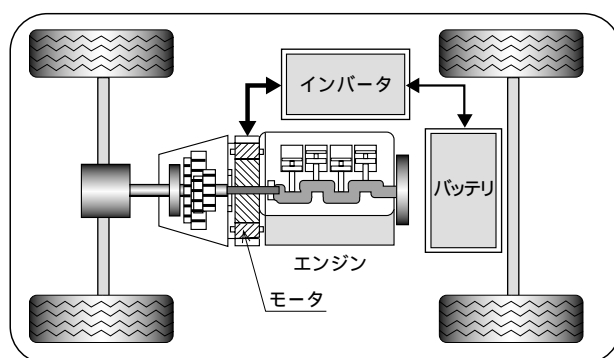


図7 タイプ3モータ搭載ハイブリッド自動車システム
バッテリーの電圧は42V、モータはスタータ、ジェネレータ、
発進・加速時の駆動力補助の機能を有している。

4. 製品仕様

これまでに開発した電気自動車用・ハイブリッド自動車用モータの諸元を表3に示す。この表から分かるように3章で述べた小型・軽量・高出力化技術を用い、モータ・インバータの小型・軽量・高出力化を実現している。

パラレルハイブリッド方式に適用されるタイプ3モータの速度・トルク・出力特性を図6に、このモータを用いたハイブリッド自動車のシステム構成を図7に示す。このシステムではバッテリーの電圧を42Vとし、モータはスタータ、ジェネレータ、発進・加速時の駆動力補助の3つの機能を有している。このシステムにおいて、当社の小型・軽量・高出力モータ・インバータの効果により、燃費が約40%改善することが立証されている。

5. まとめ

当社が開発した電気自動車用モータ・インバータの小型・軽量・高出力化技術について述べた。モータは磁石配置の工夫、ロータ極数/ステータスロット数の組合せの最適化、集中巻の採用等により、同体積で従来サーボモータの約2.5倍の出力を実現した。また、インバータは水冷構造、制御回路、電源回路の一体基板化により、同出力の従来サーボアンプの1/3の体積を実現できた。

また、これらの技術を用いたモータ・インバータをハイブ

リッド自動車のシステムに搭載することにより、燃費の改善効果が十分にあることが分かった。

今後は、更なるモータ・インバータの小型・軽量・高出力化を実現するため開発を進めていくとともに、信頼性を向上させ適用車種の拡大を図っていきたい。

参考文献

- (1) モータジェネレータの出力と燃費改善率の関係及びメーカカタログデータ D&M日経メカニカル 日経BP社 No.573 (2002) p.81



西尾章
神戸造船所
機械・環境プラント部
EVモータ課



平野雅弘
神戸造船所
機械・環境プラント部
EVモータ課



加藤義樹
神戸造船所
機械・環境プラント部
EVモータ課主席



入江隆之
技術本部
高妙研究所
燃焼・伝熱研究室主席



馬場功
西菱エンジニアリング