

産業・車載用永久磁石モータ及びドライブ装置

Permanent Magnet Motor and Drive Equipment for Industrial and Vehicular Applications

吉田 弘毅
YOSHIDA Koki萩原 敬三
HAGIWARA Keizo大石 浩司
OOISHI Koji

モータドライブ応用分野に対しても、地球環境保護の面から、より高効率、省資源、省スペースなどが求められているが、これらの解決策の一つとして、永久磁石 (PM: Permanent Magnet) モータとそれを駆動するドライブ装置がある。今般、最新の電磁解析手法によるPMモータの設計最適化技術と、PMモータをドライブする最適な制御アルゴリズムを搭載した専用ドライブ装置の開発により、超小型・軽量、高効率を実現した。

In order to realize environmental protection, there is strong demand for higher efficiency, natural resource saving, and space saving in motor drive applications. We have developed technologies for permanent magnet (PM) motors and their control equipment that provide an effective solution meeting these requirements.

This paper describes the optimization of PM motors and their control equipment using specialized drive control in the field of industrial and vehicular applications.

1 まえがき

環境保護への取組みが地球規模で広がり、温暖化及びオゾン層破壊防止のために、エネルギーの効率的活用の推進が求められている。

産業分野では、消費電力の約70%が生産用、空調用動力としてモータで消費されているため、モータの高効率化が環境保全、電力使用量の抑制、経費削減の観点から注目されている。これらの問題点を解決するために、当社は回転子に永久磁石を内蔵し、磁石トルクを利用した小型・軽量、高効率のPM同期モータと、汎用インバータをベースとした専用のドライブ装置を開発した。また、新しい応用分野として、PMモータを駆動源に用いた電気自動車が急速に注目されつつあり、排出ガス(二酸化炭素(CO₂))による温暖化、大気汚染(窒素酸化物(NO_x), 粒状物質(Particulate Matter))などの環境問題や化石燃料枯渇によるエネルギー問題の解決策として、非常に有効とされている。

こうした時代の要求にこたえるために、用途に合わせて最適な設計が可能な超小型・軽量、高効率のPMモータとドライブ装置(以下、PMモータ・ドライブと略記)を開発した。

2 PMモータ・ドライブ

2.1 PMモータの種類

PMモータは、回転子の磁石配置によって、SPM (Surface Permanent Magnet) モータ、IPM (Interior Permanent Magnet) モータ、PRM (Permanent magnet Reluctance Motor) などに分類される(図1)。PMモータの駆動には、いずれの場合も磁極位置を検出する必要があり、一般的には

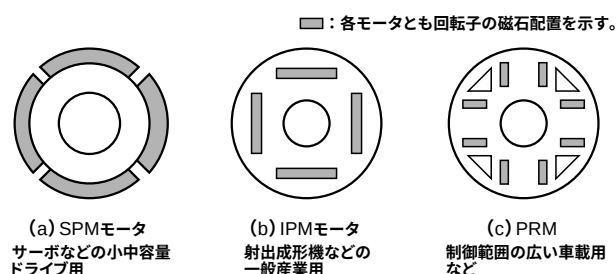


図1. PMモータの種類(固定子の断面による分類) PMモータが、
回転子の磁石配置により種類が異なる状況を示す。
Types of PM motors

エンコーダなどのセンサを使用する。ここでは、永久磁石の使用量を低減でき、磁石トルクとリラクタンストルクを併用して、高トルク、高効率化を実現することができるPMモータとして開発したIPMモータ、PRMについて述べる。

2.2 PMモータ用ドライブ装置

システムの構成を図2に示す。PP7はモータドライブ専用開発された高性能32ビットマイコンで、制御用プログラムはPP7専用アセンブラ(機械語変換用ソフトウェア)によって記述される。産業・車載用PMモータ・ドライブともに核となる制御を実行し、運転シーケンス以降の速度制御、トルク制御、ベクトル演算、PWM(Pulse Width Modulation)出力制御を行う。

基本的な制御は、エンコーダから得られる磁極位置をd(励磁)軸方向としてベクトル制御を行う方式であり、速度制御ループの内側に電流制御ループを持っている。IPMモータでは、速度制御器の出力であるトルク基準とリラクタンストルクを利用するために、d軸、q(トルク)軸の各電流基準に振り分ける処理が必要になる。

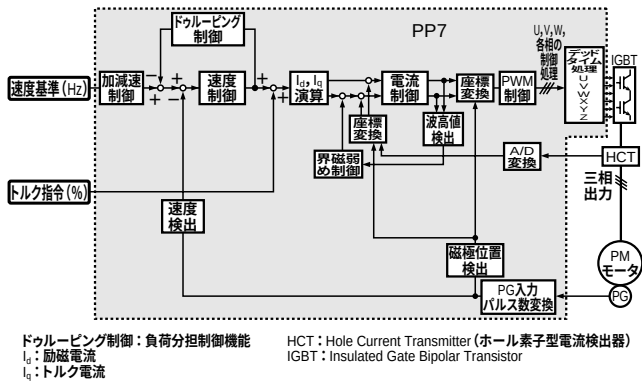


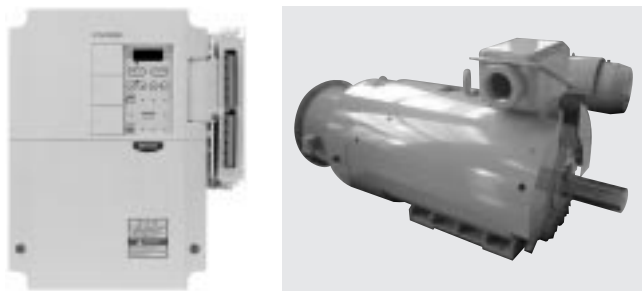
図2. PMモータ・ドライブ制御の構成 基本的な制御アルゴリズムは、三相誘導電動機のベクトル制御と似ている。

Configuration of PM motor drive

3 産業用PMモータ・ドライブの開発

3.1 システム構成

当社では、産業用PMモータ・ドライブとして、産業用インバータとPP7を用いた専用オプションユニットを組み合わせたPMモータ専用のドライブ装置と、可変速専用IPMモータを開発した。外観を図3に、仕様を表1に示す。



(a) 3.7 kW PMモータ用ドライブ装置

(b) 12極, 300 kW, 1,200 min⁻¹ PMモータ

図3. PMモータ・ドライブの外観 (a)は3.7 kW PMモータ用のドライブ装置を, (b)は12極, 300 kW, 1,200 min⁻¹のPMモータを示す。

PM motor drive

3.2 産業用のPMモータ用ドライブ装置

産業用のPMモータ用ドライブ装置の基本構成は、産業用インバータとして既に製品化されているTOSVERT™ VF-A7の主回路とゲートアレーを含む主回路部、検出回路、及び制御用入出力端子、通信などの外部インタフェース(I/F)から成る(図4 (a))。また、主制御部分となる、ベクトル制御などの演算を行う専用オプションユニットは、前述したPP7を核として、アナログ／デジタル(A/D)変換器、EEPROM、Flash ROM、DRAM、SRAMなどから構成されているが、

表1. 産業用PMドライブの仕様概要

Specifications of PM drive for industrial use

■個別仕様 (200Vクラス)

項目	仕様					
適用モータ出力 (kW)	30	37	45	55	75	90
機器定格	形	VFA7-				
	式	2300PY	2370PY	2450PY	2550PY	2750PY
	出力容量 (kVA)	46	55	69	84	110
	出力電流 (A)	120	144	180	220	288
	過負荷電流定格	150 % - 2 min, 215 % - 0.5 s				150 % - 1 min, 180 % - 0.3 s

■個別仕様 (400Vクラス)

項 目		仕 様									
適用モータ出力 (kW)		30	37	45	55	75	90/110	132	160	220	280/315
機器定格	形	VFA7-									
	式	4300PY	4370PY	4450PY	4550PY	4750PY	4110KPY	4132KPY	4160KPY	4220KPY	4280KPY
	出力容量 (kVA)	46	55	69	84	110	160	194	236	320	412
	出力電流 (A)	60	72	90	110	144	210	255	310	420	540
	過負荷電流定格	150 %－2 min, 215 %－0.5 s					150 %－1 min, 180 %－0.3 s				

■共通仕様

項目	仕様
電源	電圧・主回路: 200 V: 三相 200~230 V-50/60 Hz, 400 V: 三相 380~460 V-50/60 Hz
	周波数 制御回路: 200 V: 単相 200~230 V-50/60 Hz, 400 V: 単相 380~460 V-50/60 Hz
	許容変動: 電圧+10 %, -15 % 周波数±5 %
制御方式	正弦波PWM制御, ベクトル制御, 全デジタル制御, 速度制御
電気制動	発電制動回路: 発電制動駆動回路内蔵オプション対応
	発電制動抵抗器: 制動抵抗器/制動ユニット外付けオプション対応
速度制御	速度指令入力: DC±10 V (指令入力極性は接点で正/逆切換え) 又はDC 4~20 mA
	速度制御範囲: 1:500 (電動機の変速範囲に従う)
	速度変動率: ±0.01 %
加減速機能	直線加減速/S字加減速機能切換え, 時間設定: 0~60 s
トルク制御	トルク指令入力: DC±10 V/最大電流
位置検出器	エンコーダ (A, B, Z, U, V, W, RS-422 差動型)
保護機能	カレントリミット, 過電流, 過電圧, 負荷側短絡, 負荷側地絡, 不足電圧, 瞬時停電 (15ms以上), 電子サーマルによる過負荷, 始動時アーム過電流, 始動時負荷側過電流, 発電制動抵抗過電流・過負荷, フィン過熱, 非常停止, など
出力信号	故障検出信号: 1c 接点の出力
	各種信号出力: プログラマブルオープンコレクタ出力
	アナログ出力: メータ用出力7.5 Vdc-1 mA×2
保護構造/冷却構造	開放型 (JEMA1030) IP00/強制風冷

1c接点: a接点, b接点を持ち, コモンが共通な回路。
 IP00: 保護方式の種類で, 人体及び固形異物に関するものと, 水の侵入に関するものの保護レベルを示す。00とは, いずれも特別な保護を施していない構造。

VF-A7のソフトウェアも可能な限り利用した(図4 (b))。更に、主制御部となる基板はVF-A7専用オプションの筐体(きょうたい)に収納、両者間の通信は、既存のオプションバスのポートを利用する半二重式とし、標準化による開発期間短縮とコストの最適化を図った。

3.3 IPMモータの最適設計

IPMモータは、永久磁石を回転子内部に埋め込む新しいタイプのPMモータである。表面はり付け型のSPMモータと比較して、永久磁石トルクのほかに磁気突極性によるリラクタンス トルクも有効に利用することができるため、モータの小型・軽量化と高効率化を実現している。また、永久磁石

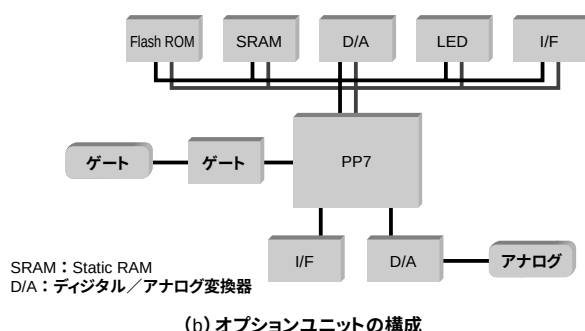
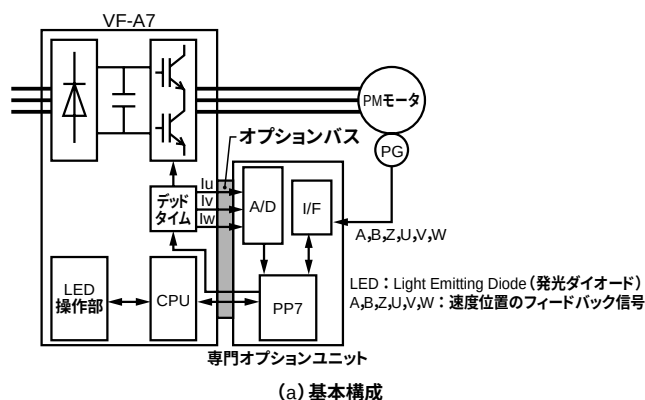


図4. 産業用のPMモータ用ドライブ 基本構成はTOSVERTTM VF-A7と専用オプションユニットから成る。オプションユニットは、A/D変換器及び各種ROM, RAMから構成される。
Inverter for industrial use

を埋め込むことにより磁石の保持環が不要で、断面形状が単純化でき、回転子表面に発生する渦電流損が低減できる。一方、IPMモータのトルク特性は鉄心の磁気飽和の影響を受けやすく、また埋め込む永久磁石の大きさや配置などによっても変化する。そのため、IPMモータの開発にあたっては、有限要素法による電磁界解析（以下、FEM解析と記述）を実施して、磁気飽和の影響を考慮しながら埋め込む永久磁石の大きさや配置などを決め、回転子形状の最適化を実施した。IPMモータのFEM解析例を図5に示す。IPMモータは、電流位相を制御することによって運転し、その鉄心の磁気飽和は電流位相によって変化する。したがって、IPMモータのトルク特性の算出にあたっては、鉄心の磁気飽和を把握することが重要である。

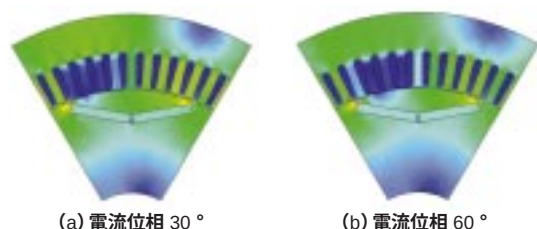


図5. IPMモータのFEM解析例 電流位相が変化することによって、磁束密度分布も変化する。
FEM analysis of interior permanent magnet (IPM) motor

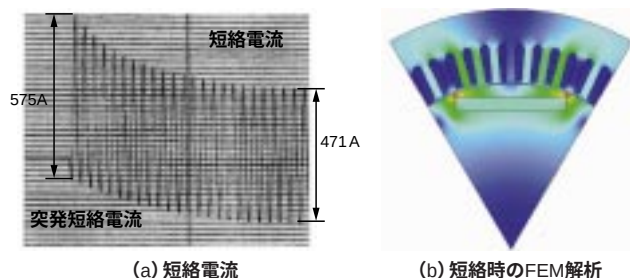


図6. IPMモータの短絡試験時のFEM解析による検証 短絡試験で短絡電流の大きさを測定し、FEM解析で永久磁石が受ける減磁界の影響を検証して、IPMモータの信頼性を向上させている。
Results of short circuit testing of IPM motor

3.4 IPMモータの実用化

IPMモータは、永久磁石を使用しているためモータ端子に誘起電圧が発生する。事故などで端子間が短絡すると、モータには大きな短絡電流が流れ、この短絡電流による磁界の影響で永久磁石の磁束が減少して減磁する可能性がある。IPMモータの実用化にあたっては、図6 (a)に示すように端子間を短絡して短絡電流の大きさを測定し、更に図6 (b)に示すようにFEM解析を実施して短絡時に永久磁石が受ける減磁界の影響を検証し、短絡時の減磁界にも耐え得る永久磁石を採用する必要がある。そのほか、特性試験に加えて、d軸、q軸リアクタンスの算出手法の確立、コギングトルク（磁石の極数に応じて発生するトルク変動）低減効果の検証、交流リアクトル（ACL）フィルタによる特性改善及び騒音低減効果の検証、零速度制御におけるトルク特性のFEM解析及び実測、また、モータを小型化したことによる軸強度の検証などを行い、IPMモータの信頼性の向上を図っている。

3.5 IPMモータのシリーズ化

現在、IPMモータは、高効率及び小型・軽量化を求めた市場ニーズにこたえられるように、30～315 kWまでのシリーズ化を進めている。従来の誘導機と比較して損失を30%低減、質量を40%低減、枠番の2枠ダウンを実現している。既に、図3 (b)の300 kWのIPMモータを客先に納入するなど、これまでに多くの実績があり、客先より高い評価を得ており、今後、新しい時代のニーズに適応する製品となるものと期待される。

4 車載用PMモータ・ドライブの開発

4.1 車載用モータ・ドライブに要求される性能

車載用モータ・ドライブは、産業用と基本的構成は共通だが、運転領域や使用環境の違いから設計上多くの相違が生ずる。

4.1.1 広い運転範囲を持つ出力特性 自動車の走行に必要な駆動力は、図7のような車速—トルク特性である。内燃機関では、この特性を得るために変速機が必須になるが、モータ特性には定トルクと定出力の領域が特性上あるた

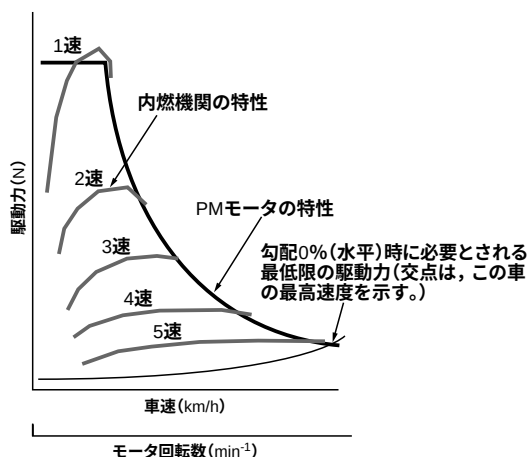


図7. PMモータと内燃機関の駆動力曲線の比較 自動車のPMモータに求められる速度－駆動力特性は、内燃機関の駆動力特性に近似している必要がある。

Torque characteristics

め、この特性を生かすことで変速機なしで走行に必要な駆動力を実現することが可能となる。

4.1.2 高出力・小型化 電気品はすべて車両に搭載されるため、要求される出力が大きい割に搭載スペースと質量の制限が厳しい。つまり、インバータ、モータともに体積に対して発熱量が大きくなるため、耐熱材料の厳選や冷却方法に工夫が必要となる。また、他の機器スペースに影響されて形状の自由度があまりなく、モータとして理想的な形状よりも扁平（へんぺい）になることが多い。そのほか、モータの回転数は高出力を実現するために高速化されるので、回転強度を高めることも必要になる。

4.1.3 高効率化 車載電気品は、搭載できる限られた燃料で運転される。運転領域が広く、定格点以外、特に軽負荷での運転時間が長いため、運転全域で優れた効率が必要である。インバータ制御方法を含む総合的な効率の向上が要求される。

4.1.4 耐環境性 耐振動（路面、エンジンからの振動など）、耐高温、耐低温、耐混入物（粉塵（ふんじん）、潤滑油など）への十分な考慮が必要となる。

4.1.5 高信頼性（メンテナンスフリー） 車両寿命を考慮した高い耐久性と信頼性が要求される。基本的に、メンテナンスフリーが前提である。

4.1.6 低騒音・低ラジオノイズ 騒音は乗りごちに影響するため、低騒音及び低振動化が必要である。また、インバータはスイッチング動作による漏れ電流などの影響でラジオノイズを発生するため、ラジオ障害、ノイズ障害の対策も必要となる。

4.1.7 低コギングトルク、低トルクリップル トルク変動も乗りごちに不快感を与えやすい。また、変速機などと直結される場合には、メンテナンス時に問題が発生するこ

とがある。

4.1.8 低価格 システム価格を内燃機関並みにする必要がある。

4.2 車載用PMモータの開発

初期のPMモータは、高出力、高効率、高力率ではあったが、定出力領域の効率改善と弱め界磁制御領域の拡大が課題であった。また、高価な希土類磁石を大量に使用するため、高性能で低価格の新しいモータの開発を進めた。

4.2.1 磁性保持リングPMモータ PMモータの速度制御範囲拡大と高速化のために開発されたもので、永久磁石の保持に金属磁性リングを用いて鎖交磁束を制御しやすいモータである（図8）。また、高トルク化と弱め界磁の制御特性に優れ、強固な金属により磁石が保持されるため超高速回転化が可能である。

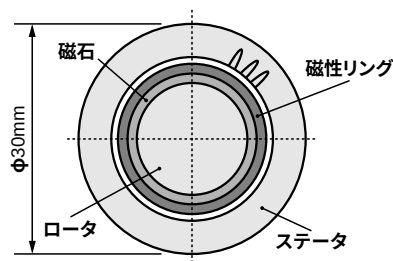


図8. 磁性保持リングPMモータの構造 回転子は、金属保持リングによって磁石が保持されているために、高速回転向きである。

Structure of retaining magnetic ring permanent magnet (MR-PM) motor

4.2.2 PRM 永久磁石による誘導起電力を小さくして高速側の速度制御範囲を広げること、高価な永久磁石の使用量を減らすことを目的として開発された。突極比（ L_d/L_q ）を高め、リラクタンストルクを主として用いるモータである。図9の永久磁石は、漏れ磁束（q軸の電機子磁束）を低減し、出力と力率を向上させる補助的な役割をしている。その結果、リラクタンストルクと永久磁石トルクの比は

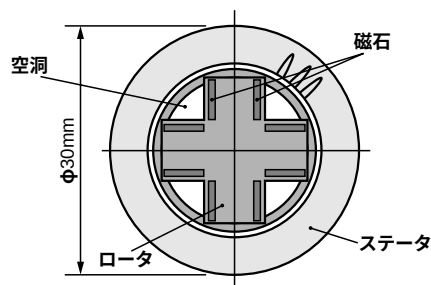


図9. PRMモータの構造 回転子は、磁石と切欠き（空洞部）を理想的に配置することで、d軸とq軸のインダクタンス差が大になるように構成されている。

Structure of permanent magnet reluctance motor (PRM)

7:3程度となっている。このモータの誘導起電力は、一般的なIPMモータの1/2以下となり、永久磁石の使用量も20%以下にすることができ。また、弱め界磁特性の改善、高効率化、低コスト化も可能となる。

4.3 車載用モータ・ドライブ制御技術

電気品ではなく内燃機関と比較されることから、通常の電気品の応用技術では単純に成立させることが難しい。そのため、電池という限られたエネルギー源を有効利用するための高効率、小型・軽量化を目指した高密度実装、低ノイズ化、耐環境性強化、新冷却方式などの新しい技術が開発された。一方、制御においても、パワーエレクトロニクス専用マイコンPP7の能力を限界まで使用した新しい制御を開発した。

4.3.1 最大電圧ベクトル制御 電源電圧の有効利用とインバータの低損失化による効率向上を目的として、最大電圧ベクトル制御を開発した。一般的に使用されている非同期PWM制御では、制御に使用可能な電源電圧の利用率が少し低い。また、高速運転を安定的に行うためにはスイッチング周波数を高くする必要があり、スイッチング損失が増加して効率が悪化するうえ、電磁波ノイズも増える傾向がある。最大電圧ベクトル制御では、低回転運転時は非同期PWM制御を行うが、誘起電圧が高くなる中・高速時には1周期1パルスの方波制御に切り換える。これにより、電圧利用率が非同期PWMに比較して10%程度上がるうえ、高速での電流応答も可能である。インバータの効率も上がるため発熱量が減り、冷却上も有利である。

4.3.2 回転センサレス制御 PMモータの運転は、回転子位置に応じてモータの電流を制御する必要があるため、通常レゾルバ(回転検出器の一種)やエンコーダなどの回転位置センサが用いられる。しかし、このセンサは、モータの小型化や信頼性、コストなどで課題があることから、回転位置センサなしで運転が可能なセンサレス制御が求められている。速度起電力ベクトルの方向と大きさを用いて回転子の位置を推定する、センサレス制御の開発を進めている。

5 今後の動向

5.1 産業用PMモータ・ドライブ

今回述べたVF-A7 PMモータ用ドライブは、汎用品の中でも高機能型に分類され、回転検出器の一種であるPG(Pulse Generator)フィードバックによる高精度速度制御を実現するために制御部にPP7を使用している。

現在、産業用PMドライブの市場は、低速域、高トルクが必要となる射出成形機、押出し機のような定トルク用途が中心であるが、今後は、より高精度な速度制御、トルク制御、あるいは位置決め制御を可能とすることにより、プロセス用ライン制御用途、サーボ用途への拡大が期待できる。一方、工場の設備などのファン、ブロー、ポンプに対して、省エネルギ

ーを目的とした誘導電動機の置換え需要をカバーするために、より低価格のPMモータ・ドライブの製品化が必須であり、汎用インバータをベースとしたセンサレスベクトル制御によるPMモータ・ドライブを開発中である。

5.2 車載用PMモータ・ドライブ

小型、高効率、低価格などが今後の課題である。モータの大きさは、高性能磁石が使われることで劇的に小型化した。今後も種々の特性を実現するため研究を進めるが、いかに価格を抑えるかが大きなテーマとなる。

インバータについては、よりいっそうの小型化のために構造設計や回路設計の改良を進めている。性能向上のため、高効率化やラジオノイズの低減制御も開発中であり、実現すれば現在対策として使われている高価なシールドケーブルやコネクタが不要となる。また、半導体関係でもパワーエレクトロニクス専用マイコンをはじめ、パワーデバイスの開発が進められており、製品化を念頭にいた高性能低価格のPMドライブを準備中である。

現在、車載用モータドライブに関して、国内ではPMモータが主流であるが、海外では誘導機が主流である。これは、誘導機が低価格であること、技術的に成熟していることや誘導機に有利な高速運転が多い交通事情などが影響している。しかしながら、今後磁石の低価格化が進めば、本来持つ高効率・高出力などの利点からPMモータが世界の主流になると考える。

6 あとがき

産業用PMモータ・ドライブについては、今後、より高精度な速度制御、トルク制御、あるいは位置決め制御の実現と、省エネルギーを目的とする汎用センサレスのPMモータ・ドライブの検討、また、車載用PMモータについては、よりいっそうの小型・高効率化の向上を進め、かつ両者とも、低価格化を進めていく所存である。



吉田 弘毅 YOSHIDA Koki

東芝産業機器製造(株) 産業エレクトロニクス機器事業部。
産業用インバータの応用技術、商品企画に従事。
Toshiba Industrial Products Manufacturing Corp.



萩原 敬三 HAGIWARA Keizo

情報・社会システム社 ITS・自動車事業統括部主務。
車載用モータドライブの開発に従事。日本機械学会会員。
ITS & Automotive Business Planning Div.



大石 浩司 OISHI Koji

ティーエムエイエレクトリック(株) 東部事業所 中形回転機部。
永久磁石モータの開発・設計に従事。電気学会会員。
TMA Electric Co.