自動車技術

正員 大熊 繁 (名古屋大学大学院)

Vehicular Technology

Shigeru Okuma, Member (Nagoya University)

Electrical engineering in the vehicular technology is very promising. In this paper, improvements in the conventional engines, hybrid vehicles, motor drives, power electronics, sensing technologies, control and information technologies are discussed.

キーワード：自動車，電気工学，パワーエレクトロニクス，センサ，制御，情報

Key words: Vehicles, Electrical engineering, Power electronics, Sensors, Control, Information

1. はじめに

21世紀の自動車における電気工学の役割は極めて大きい。そこで，電気学会産業応用部門では平成13年4月に自動車技術委員会を立上げ，「42V化」，「安全走行支援システム」，ならびに「外部情報を利用した自動車交通の高効率制御」という3つの調査専門委員会を設置した⁽¹⁾。

これらの活動を踏まえて，本解説では，自動車技術について産業応用部門の技術分野を中心に述べる。

2. 内燃機関自動車

2.1 42V電源化

従来の内燃機関自動車はこれからも主流となるものであり，色々な改善策の中で42V電源化⁽²⁾と電磁駆動弁・無段変速機⁽³⁾の導入は重要な課題である。42V電源化は，電気負荷の増大に対応するため，従来の標準電圧14V（バッテリー電圧12V）を3倍の42V（バッテリー電圧

36V）に高電圧化することである。高電圧化の狙いは次のようなものである。

- (1) 燃費向上と排出ガス低減
- (2) 電動化による軽量化・低コスト化
- (3) モータ効率向上とワイヤハーネスの細線化
- (4) 新機構の追加

従来の14V電源においては，100W程度の電気負荷がほとんどであった。42V電源においては，図1に示すような1kWを超える電気負荷が考えられる。

- (1) エンジン系…電磁駆動弁
- (2) 駆動系…ベルトやチェーンの駆動によるモータ・ジェネレータ，クランク直結駆動のインテグレートッド・スタータ・オルタネータ，発進補助
- (3) シャーシ系…電動パワーステアリング，電動ブレーキ
- (4) ボデー系…電動エアコン，霜取りウインドシールドガラス，シートヒータ，PWMヘッドライト制御

高電圧化により，燃費向上が期待できる。車両の燃費向上の基本要素には，軽量化などの走行抵抗の削減，パワーtrainの効率向上，アイドルストップなどの無駄エネルギーの削減，ならびに回生制動などの廃エネルギーの回収などがあり，高電圧化は3番目と4番目に対応する。燃費向上は，エネルギー解析を要するが10%から15%程度であると言われている。

42Vを実現する技術課題として次のようなものがある。

- (1) 36Vバッテリー…鉛シール電池がベースで，今後はニッケル水素電池，リチウムイオン電池に移行する。
- (2) ワイヤハーネス…重量とコストの他に，回路保護，ノイズ対策，難燃化，リサイクル性が条件となる。

図1 42V系将来システム図

Fig.1 Configuration of the 42V system

図2 内燃機関自動車の改良

Fig.2 Improvement of gasoline vehicle

図3 電磁駆動弁

Fig.3 Electromechanical valve actuator

- (3) 42V用リレー…耐アーク性が大きな問題であり、半導体リレーやアーク対策をしたメカニカルリレーが検討されている。
- (4) 42Vと14Vの2電源システム…当面は従来システムに、MGとインバータ、DC-DCコンバータ、ならびに36Vバッテリーを追加したシステムとなる。

2.2 電磁駆動弁と無段変速機

内燃機関自動車を改良する他の方法には、図2に示す電磁駆動弁と無段変速機がある⁽³⁾。

従来のエンジンでは、出力軸の回転に連動する機械的なカム機構により、吸気弁と排気弁を駆動している。この場合、弁が開閉するタイミングは自由に選ぶことができない。エンジンの回転に関係なく自由にタイミングを選ぶことができれば、30%近いトルクや馬力の向上につながる。その結果、エンジンの小型化、軽量化、燃費向上が可能となる。そこで、図3に示すような電磁駆動弁が提案されている。移動子は両側のバネで支えられており、両側の電磁石を交互に励磁することにより弁を開閉する。弁は数ミリ秒で開閉するので、開閉動作を確実にするため高速で高精度な制御を必要とする。実用的には、移動子と電磁石との衝突による騒音・振動が問題となっている。

次に無段変速機について考える。馬力は、トルクとエンジン回転数との積であり、設定馬力を出力するためのトルクとエンジン回転数の組み合わせは無数にある。その中で最大効率点を選ぶことにより、高効率運転を実現することができる。そこで、従来の段階的に変速比が変わる有段

図4 エンジン効率

Fig.4 Efficiency of engine

図5 ハイブリッドシステム

Fig.5 Hybrid system

変速機に替わり、無段変速機を用いて最大効率点を選んでエンジンを運転することが検討されている。

3. ハイブリッド自動車

3.1 ハイブリッドシステム⁽⁴⁾

エンジンと電気モータの駆動力を組み合わせるシステムをハイブリッドシステムという。シリーズ方式（エンジン～発電機～コンバータ～インバータ～モータ～車輪）とパラレル方式（エンジン～車輪と、エンジン～発電機～コンバータ～インバータ～モータ～車輪との並列）、ならびに混合方式がある。図5にプリウスとティーノ⁽⁵⁾の混合方式を示す。図6にプリウスの動作を示す。

図6 ハイブリッドシステムの動作

Fig.6 Operations

(1) 発進時および軽負荷時

エンジンを停止させて、バッテリーからインバータを用いてモータを駆動する (A)。

(2) 通常走行時

エンジン動力を2つに分けて、一方は車輪を直接駆動する (B)。他方は、発電機を駆動して発電し、モータを駆動して駆動力を補う (C)。

(3) 全開加速時

さらに、バッテリーからもモータに電力を供給する (A)。

(4) 減速時・制動時

モータを発電機として動作させ、回生電力をバッテリーへ供給する (A)。

プリウスは、市街地走行燃費において、従来車の約2倍の燃費 (CO_2 排出量が1/2) を達成している。燃費向上の100%のうち、40%が燃費効率の良い領域での運転により、40%がその領域に特化して効率を上げたエンジンの採用による。残りの20%は減速制動時の電力回生による⁽⁵⁾。停車時のエンジン停止も燃費向上に寄与している。

起動時と低速走行時をモータ駆動とすることにより、排出ガス (CO , HC , NO_x) を低減できる。

さらに、発電機による電力によりモータ駆動することで、変速機の要らない滑らかで良好な運転応答を実現している。

3. 2 マイルドハイブリッドシステム⁽⁶⁾

最近、ハイブリッドシステムをさらに普及させるため、36Vのバッテリーを採用し、既存のパワートレインの改造を最小限に抑え、従来車両に追加する形で搭載可能なマイルドハイブリッドシステムが開発された。従来の内燃機関に、アイドルストップ、エネルギー回生制動を行い、燃費向上 (CO_2 削減)、アイドル騒音低減を実現している。その結果、10-15モードで従来車よりも15%の燃費向上を達成している。図7にシステム構成を示し、動作を示す。

図7 システム構成

Fig.7 System configuration

(1) 発進時

ブレーキペダルを離すと同時に電磁クラッチが閉じ、モータジェネレータ (MG) によりエンジンの回転数を上昇させ、車両を推進させるクリープ力を発生する。アクセルペダルを踏むか、所定の時間後に、エンジンを始動しエンジン走行に入る。

(2) 走行時

エンジン出力により走行する。必要に応じて36Vバッテリーを充電する。

(3) 減速時

車輪がMGを駆動して回生制動を行ない、36Vバッテリーを充電する。

(4) 停止時

MGを用いて滑らかにエンジンを停止する。電磁クラッチを用いてエンジンを切り離し、MGによりパワーステアリングとエアコンを駆動する。

本システムでは、モータジェネレータ (MG) の役割が大きい。図8にトルク特性を示す。発進時はMGによりエンジン回転数を停止からアイドル回転数まで上げる。トルクは、最大トルクである約56Nmを発生する。バッテリーの充電については、3,000rpm以下では、誘起電圧が低いため、インバータにより昇圧して36Vバッテリーを充電する。3,000rpm以上では誘起電圧は十分高いので、界磁電流を変えて電力を制御して充電する。14V電源は、DC-DCコンバータを用いて充電する。

固定子コイルに平角銅線を用い、末端を溶接するセグメントコンダクタ方式を用いている。その結果、従来の丸線に比べて20%の小型化を実現している。

さらに、インバータ、DC-DCコンバータ、ならびにECU (Engine control unit) を一体化してパワーコントロールユニットとし小型化を図っている。

図8 MGトルク特性

Fig. 8 MG torque characteristics

4. モータドライブとパワーエレクトロニクス

4. 1 モータドライブ技術⁽⁵⁾⁽⁷⁾

自動車におけるモータは、駆動系と補機系に分けることができる。駆動系は、電気自動車、ハイブリッド自動車に使う大容量のモータである。日本では、高効率、小型軽量であることから、永久磁石型同期モータが主流である。欧米では、誘導モータを使うことが多い。補機系モータでは、永久磁石型同期モータ、誘導モータ、直流モータ、シンクロナスリラクタンスモータが使われる。永久磁石型同期モータは電動エアコンに用いられ、誘導モータはスタータジェネレータに用いられている。直流モータは、パワーステアリング、スロットルアクチュエータを始めとして、幅広く用いられている。シンクロナスリラクタンスモータは、パワーステアリングに試みられており、細長くなく扁平形状であれば仕様を満たすと思われる。

駆動系モータは、電源電圧150Vから300Vであり、モータ出力は10kWから50kWである。小型軽量のみでなく広い可変速特性が要求され、基底速度と最高速度の比で、1:3、ときには1:5の速度範囲を要求される。駆動用としての永久磁石型同期モータは、ネオジウム鉄系の永久磁石を用い、図9に示すように表面磁石型(SPM)、埋め込み磁石型(IPM)、ならびにリラクタンストルク比を高くした永久磁石式リラクタンスモータ(PRM)がある。

永久磁石式リラクタンスモータの原理を示す⁽⁸⁾。(d)に示すリラクタンスモータ(RM)は、励磁電流を変えて磁束を変化できるので弱め界磁が容易である。しかし、q軸での漏れ磁束が大きいため、低出力で低力率になる。そこで、回転子に磁気的な異方性を持たせ、q軸の電機子反作用磁束を打ち消すため永久磁石をおいてある。等価的に突極比を高くした構造であり、鉄心の飽和時で突極比3を得ており、効率は最高97%を得ている。

同期モータ制御には、次のような課題がある。

図9 回転子の形状

Fig. 9 Rotor configurations

(1) センサレス制御

モータの磁極位置を検出するため、回転位置センサが必要である。しかし、センサはコスト、スペース、信号線を必要とし、取り付け精度も要求される。そこで、回転位置センサレス制御が求められている。停止時・極低速回転時は、インダクタンス変化や磁気飽和を用いて磁極位置が検出でき、低速回転時から速度起電力を用いて検出できる。

現実には、ゼロ速度で最大トルクが出せること、電流センサ・電圧センサ・インバータデッドタイム・モータパラメータ等のばらつきがあっても推定できること、速度急変時に追従できること、逆走・暴走しないこと等の厳しい条件をクリアする必要がある。

(2) 1パルス制御

電車では、弱め界磁領域で1パルス制御(方形波制御)が用いられた。図10に示すように1パルス制御は、PWM制御に比べて電圧利用率が高く、スイッチング損失が少ないので、効率向上が可能となる。1パルス制御では、電圧振幅は制御できないので、電流指令値と実際の電流値との差をとり、1パルスの電圧位相制御を行う。これにより、モータのトルクとなる有効電力を制御することができる。

(3) 自動車特有の制御

自動車特有の条件として、障害物があるときの大きな停止トルク、空転後の着地時のような高加減速率、急速なトルク変動による軸ねじり振動、定速走行時のハイブリッド自動車における軽負荷時のモータの高効率化などがあり、電車では必要なかった技術開発が求められている。

4. 2 パワーエレクトロニクス技術⁽⁵⁾⁽⁷⁾

パワー素子としては、IGBTとパワーMOSFETがある。42Vのバッテリーシステムでは、耐圧75Vから100VのパワーMOSFETが用いられる。300Vのバッテリーでは、耐圧600VのIGBTが用いられる。耐圧200Vが2つの素子の分岐点となっている。構造はプレーナ形からトレンチ形、さらに微細化トレンチ形へ移行する。SiCのような高温動作デバイスも可能性がある。インバータは、エンジンルームに置かれるので冷却が大きな問題である。低コストで冷却できるモジュール構造が求められている。

図10 PWM波形と1パルス波形

Fig. 10 Waveforms of PWM and one pulse

5. センシング技術

ITS(Intelligent Transport Systems)における運転支援システムは、AHS(Advanced Cruise Assist Highway System)とASV(Advanced Safety Vehicle)との2つのプロジェクトで研究されている⁽⁹⁾。

AHSでは、次の7つの項目を検討している。

- (1) 前方障害物衝突防止支援
- (2) カーブ進入危険防止支援
- (3) 車線逸脱防止支援
- (4) 出会い頭衝突防止支援
- (5) 右折衝突防止支援
- (6) 横断歩道歩行者衝突防止支援
- (7) 路面情報活用車間保持等支援

ASVでは、次の項目を検討している。

- (1) 予防安全支援
- (2) 事故回避技術
- (3) 全自動運転技術
- (4) 衝突安全技術
- (5) 災害拡大防止技術
- (6) 車両基盤技術

これらにおいて、車間距離を一定に保つレーダクルーズコントロールシステム、赤外線を用いて夜間の人間を認識するナイトビジョン、ならびに道路の白線を検出するレーン逸脱防止支援システムなどが開発されている。レーダクルーズコントロール、ナビ協調ATシフトコントロール、駐車アシスト、ブラインドコーナモニタなどは、既に市場に投入されている⁽¹⁰⁾。

それらの例を次に示す。図11に示すようなセンサを用い、車線維持支援・車線逸脱警報システム、渋滞追従制御付きACC、ならびに追突速度低減システムを構成した⁽¹¹⁾。ウインドシールドガラスに搭載したCCDカメラから得られた前方画像について、空間微分を行い変換処理を行った後、得られた白線輪郭らしい線分から、車両と車線の相対的な横位置Y、姿勢角 θh 、ならびに道路半径Rなどを求める。得られたデータから、旋回するときに必要な操舵トルクを出力し、走行支援する。望ましい Y_d と現在のYとの差を零とし、姿勢 θh を零とするような操舵トルクを発生して走行支援する。ドライバの意思による操舵操作があるときは支援トルクを減少してドライバの意思を優先する。この結果、ステアリングトルクが小さくなり、ステアリング角は零に近くなった。つまり、大きくハンドルを切ることとはなくなった。

次に、図12のようなシステムにおいて、ナイトビジョンシステム、車両の進行方向を照らすアクティブヘッドライト、ならびに情報通信システムを構成している⁽¹¹⁾。ナイトビジョンは、歩行者事故低減を目的として、音声案内と赤外線映像のヘッドアップディスプレイ表示を行うものである。歩行者は高温対象物であり、赤外線カメラでは白く表示される。その画像をステレオ画像処理して距離を求め、

図11 センサの配置(1)

Fig.11 Sensors(1)

図12 センサの配置(2)

Fig. 12 Sensors(2)

時間変化から相対移動ベクトルを求め、移動速度による人間の識別と衝突可能性を判定している。この結果、ドライバが人を認識し応答するまでの時間を50%に減らすことができた。

6. 制御・情報技術

電気モータはエンジンに比べて次のような特長をもつ。

- (1) トルク応答が高速であること
- (2) 駆動・制動両方向のトルクが出せること
- (3) 出力トルクが正確に観測できること
- (4) モータは分散配置ができること

このような特長を用いて電気自動車のブレーキ性能を改善し、旋回時の車両の姿勢安定性を保つことができた⁽¹²⁾。

このような自動車の高度な運動制御を実現するためには、自動車のみでなく、ドライバの運転の基本動作である認知、判断、ならびに操作をモデル化することにより、ドライバと自動車を1つの制御系に組み込む必要がある。

パワートレインを含めて、車内のアクチュエータの制御

システムは、ネットワークで結ばれる。この車内ネットワークは、外部インフラの作るネットワークに組み込まれてITSを構成する。ITSにより得られた情報を用いて、自動車運行の計画を立てることにより、自動車の効率と安全性を向上させることができる。

ITSの情報システムとして、日本においては道路の複雑さからナビゲーションシステムが普及した。現在、年間200万台、出荷累計台数700万台を超える市場となっている。それをベースにして本格的な道路交通情報を提供するVICS (Vehicle information and communication system) サービスが始まり、端末機は急速に普及している。現在、ナビの2台に1台はVICSを装着している。

2000年には、交通事故発生時に警察や救急車を速やかに派遣するためのメーデーサービスも始まっている。

無線通信を用いて通行料金の自動徴収を行うETCシステム (Electronic toll collection system) は、料金所渋滞の緩和、利便性の向上、排気ガス・騒音の軽減などの環境改善を目的として世界各国で導入されている。

移動体向けデジタル衛星放送もはじまる可能性がある。

このような情報化により、自動車の快適性はますます向上していくと思われる。

7. おわりに

自動車において用いられる電気工学のうち、産業応用部門に深い分野を中心に概要を述べた。この分野はこれからも飛躍的に発展する分野であり、自動車技術委員会では、さらに広く活動を展開してゆきたいと考えている。皆様の温かいご支援をお願い申し上げる。

(平成14年5月14日受付)

文 献

- (1) 大熊 繁:「自動車技術と電気工学」電気学会論文誌D Vol. 121-D, No. 4, 431~432 (2001)
- (2) 寺谷達夫:「21世紀の車と42V化」電気学会論文誌D Vol. 121-D, No. 4, 433~434 (2001)
- (3) 川辺武俊:「新世代の制駆動制御系」平成13年電気学会産業応用部門大会講演論文集 [I] S6-3, 127~130 (2001)
- (4) 大井敏裕・小木曾聡:「新型プリウスの紹介」TOYOTA Technical Review, Vol. 50, No. 1, 14~19 (2000)
- (5) 黒澤良一:「パワーエレクトロニクス」平成13年電気学会産業応用部門大会講演論文集 [I] S6-8, 149~152 (2001)
- (6) 寺谷達夫・倉持耕治郎・中尾初男・堀井欽吾・稲吉龍泰・水谷浩市:「アイドルストップシステム車の開発」TOYOTA Technical Review, Vol. 50, No. 1, 32~37 (2000)
- (7) 石井潤市・天野雅彦:「自動車における電動化の動向」平成13年電気学会産業応用部門大会講演論文集 [I] S

6-7, 145~148 (2001)

- (8) 堺和人・高橋則夫・霜村英二・新政憲:「可変速特性に優れたハイブリッド自動車用永久磁石式リラクタンスモータ」電気学会研究会資料 VT-02-11, 61~66 (2002)
- (9) 藤田泰彦:「安全走行支援システムとセンサの現状と将来動向」電気学会論文誌D Vol. 121-D, No. 4, 435~436 (2001)
- (10) 志賀恒男・柿原正樹:「日米欧のITS推進状況」TOYOTA Technical Review, Vol. 51, No. 2, 14~21 (2001)
- (11) 斎藤徹:「安全とセンサ」平成13年電気学会産業応用部門大会講演論文集 [I] S6-4, 131~134 (2001)
- (12) 戴建華・岡野隆宏・井上友子・坂井真一郎・内田利之・堀洋一:「電気自動車ならではの運動制御の可能性〜「東大三月号II」の走行実験報告〜」電気学会研究会資料 VT-02-9, 49~54 (2002)

大熊 繁 (正員) 1948年2月16日生。名古屋大学大学院工学研究科修士課程電気・電子工学専攻修了。1974年6月ケース・ウェスタン・リザーブ大学大学院工学研究科修士課程システム工学専攻修了。1977年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程満了。同年4月同大学助手、1979年同大学助教授、1990年12月同教授、現在に至る。工学博士。主として、ロボティクス、パワーエレクトロニクス、創発型ソフトコンピュータに関する研究に従事。計測自動制御学会、ロボット学会、IEEEの会員。IEEE IECON' Best Paper Award, 日本精密工学会論文賞、電気学会論文賞受賞。