

2014 年モデル Accord 用 SPORT HYBRID i-MMD 制御システムの開発

Development of SPORT HYBRID i-MMD Control System for 2014 Model Year Accord

井 手 博 仁*
Hirohito IDE

須 永 義 弘*
Yoshihiro SUNAGA

樋 口 成 智*
Naritomo HIGUCHI

要 旨

世界的な CO₂ 排出削減要求に対応すべく、高効率な 2 モータハイブリッドシステム SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive を開発し 2014 年モデル Accord に搭載した。その制御システムは EV ドライブ、ハイブリッドドライブ、エンジンドライブの 3 種のドライブモードを状況に応じて使い分ける。ハイブリッド化にともない 39% の燃費向上に寄与している。また大規模なシステム構成に対応したコンポーネント間協調制御を開発し、信頼性と走行性能の両立を図っている。これらのシステムと制御技術の採用により、Accord プラグインハイブリッドでは 13 mile の EV 走行距離、115 MPGe (Charge Depleting mode)、46 mpg (Charge Sustaining mode) の燃費を達成するとともに、信頼性確保のための制約条件を守りつつ走行性能を維持することを可能とした。

ABSTRACT

A highly efficient two-motor hybrid system named SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive was developed and mounted in the 2014 model year Accord to meet global demands for CO₂ reduction. The control system switches the three drive modes of “EV drive,” “Hybrid drive” and “Engine drive” according to the driving conditions. Together with hybridization, this helped to enhance fuel economy by 39%. In addition, cooperative control between components was developed that supports the large system configuration, and helped to achieve both reliability and driving performance. Installation of this system and control technology in an Accord plug-in hybrid achieved an EV driving range of 13 miles and fuel economy of 115 MPGe (Charge Depleting mode) and 46 mpg (Charge Sustaining mode). Furthermore, sufficient driving performance was also maintained while observing the constraints required to secure reliability.

1. まえがき

今日、自動車業界への CO₂ 排出削減等に代表される環境負荷低減に対する要望はさらなる高まりを見せている。その課題の一つの解決手法として、従来より軽量かつコンパクトなハイブリッドシステムである Integrated Motor Assist (IMA) システムを提案してきた。またゼロエミッションシステムである燃料電池 EV システム、バッテリー EV システムを提案してきた。今後より一層の環境負荷低減にはハイブリッドシステムのさらなる効率向上や、ゼロエミッション航続距離の向上等の改善が急務である。その対応として 2 モータハイブリッドシステム SPORT

HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive (SPORT HYBRID i-MMD) という新しいハイブリッドシステムを開発した⁽¹⁾。本ハイブリッドシステムにより従来のハイブリッドシステムからの効率向上を図り、さらに中型車に適用可能な動力性能を確保した。また大容量バッテリーとプラグイン充電機能を備えた SPORT HYBRID i-MMD Plug-in においては、ゼロエミッション航続距離の向上を達成した。

本稿では、新開発した 2 モータハイブリッドシステム SPORT HYBRID i-MMD Plug-in を例にとり、そのねらいと特徴について述べると共に、高効率化や車両信頼性確保に寄与した制御システムと実車で達成した性能について述べる。

*四輪 R&D センター

2. 開発のねらい

従来の IMA システムでは軽量でコンパクトなハイブリッドシステムの特性を生かし、主に小型車にそのシステムを搭載し燃費向上を達成してきた。しかし今後の環境負荷低減には中型車以上のクラスでも同様に燃費向上が必要であり、高効率をねらいとする 2 モータハイブリッドシステム SPORT HYBRID i-MMD を新規に開発した。本システムは EV ドライブ、ハイブリッドドライブ、エンジンドライブの 3 モードを状況に応じて使い分けており、IMA システムと比較し以下の特徴を持つ。

- (1) EV 走行領域の拡大と高効率化
- (2) エンジン高効率運転領域の拡大
- (3) 減速エネルギーの回生効率の向上

上記より、本システムは優れた燃費性能を達成可能と考えた。一方で本システムはその構成が IMA システムより大規模であり、信頼性確保のためのさまざまな制約条件を守りつつ走行性能を維持する協調動作も必要である。よって本システムをさまざまな環境条件、運転条件に応じて適切に制御し、燃費性能と走行性能を成立させる制御システムを開発した。

3. システム概要

3.1. 全体構成

SPORT HYBRID i-MMD システムの主要構成部品を Fig. 1 に示す。モータ、ジェネレータといった二つのモータと、クラッチから構成される電気式 CVT は、トランスミッションケースに内蔵され HEV 用に最適化された新開発アトキンソンサイクルエンジン⁽²⁾とともにエンジンルーム内に配置される。Li-ion バッテリ電圧を昇圧する Voltage control unit、モータ⁽³⁾およびジェネレータ制御用の Motor control unit やインバータを内蔵する Power Control Unit

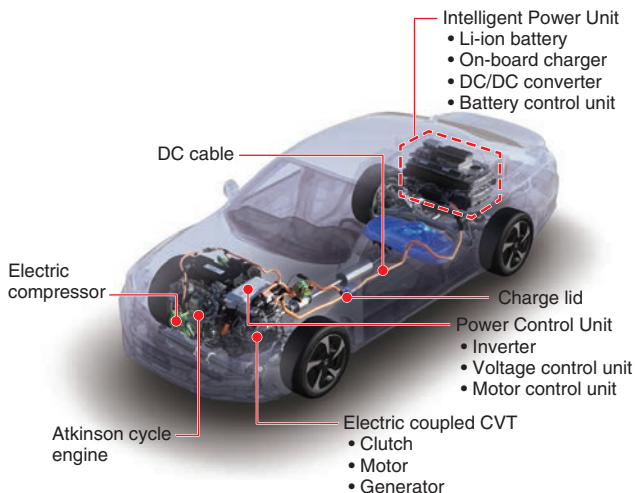


Fig. 1 Overall system configuration

Table 1 Specifications of hybrid powertrain

Engine	Type	L4 DOHC Atkinson
	Max. power [kW]	105
	Max. torque [Nm]	165
Motor	Type	Interior permanent magnet synchronous motor
	Max. power [kW]	124
	Max. torque [Nm]	307
	Max. speed [rpm]	12584
	Max. voltage [V]	700

(PCU)は電気式 CVT 上部に配置される。Li-ion バッテリ、DC/DC コンバータ、およびそれらを制御する Battery control unit で構成される Intelligent Power Unit (IPU) はリヤシート後部に配置される。プラグインハイブリッド車においてはさらに専用の高容量 Li-ion バッテリと高出力オンボードチャージャを備え、10 mile 以上の EV ドライブによる市街地走行を可能としている。

3.2. パワートレイン概要

パワートレインの概要を Fig. 2 に示す。2.0 L 直列 4 気筒エンジンおよび電気式 CVT ユニットで構成される。エンジンはアトキンソンサイクル化、VTEC、電動 VTC、クールド EGR の採用、および低フリクション化により従来の 2.0 L エンジン比で正味燃料消費率 (Brake Specific Fuel Consumption: BSFC) にて 10% の効率向上を達成し、105 kW の高出力を両立させている。モータは昇圧器による高電圧化とリラクタンストルクの活用により 124 kW の高出力と最大 96% の高効率を達成している。パワートレインの主要諸元を Table 1 に示す。

3.3. プラグインハイブリッドのオペレーション概要

Fig. 3 にプラグインハイブリッドのオペレーション概要を示す。

プラグインハイブリッドの動作は以下の二つのモードに分類される。

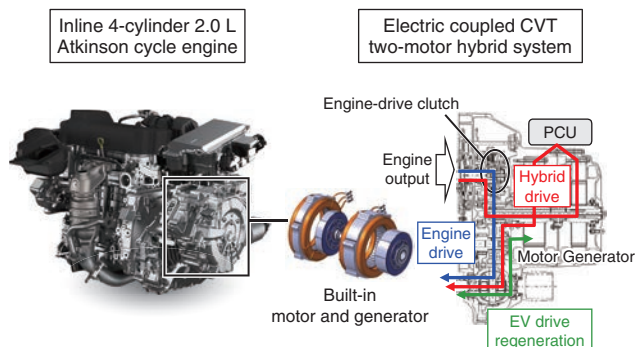


Fig. 2 SPORT HYBRID i-MMD powertrain

一つ目は、プラグイン充電により Li-ion バッテリーに貯蔵された電気エネルギーを用いて EV ドライブを主体におこなうモードで、Charge Depleting モード (CD モード) と呼ぶ。CD モードでは Fig. 3 に示すようにエンジン始動のしきい値を高く設定することで、EV ドライブ使用領域を拡大しており、13 mile の EV レンジを確保している。

二つ目は、Li-ion バッテリーの残量 (State of Charge: SOC) が所定値を下回った場合、その後 SOC を所定範囲内に保つようにガソリンをエネルギー源として走行し、いわゆるハイブリッド車として機能するモードで、Charge Sustaining モード (CS モード) と呼ぶ。

3.4. ドライブモード概要

Fig. 4 に SPORT HYBRID i-MMD システムのドライブモードの分類を示す。本システムは三つのドライブモードを有し、走行状況に応じて適正なモードを選択しシステム効率向上を図る。

第1のモードは、Li-ion バッテリーに貯蔵された電力を使用してモータで走行するモードで、これを EV ドライブ

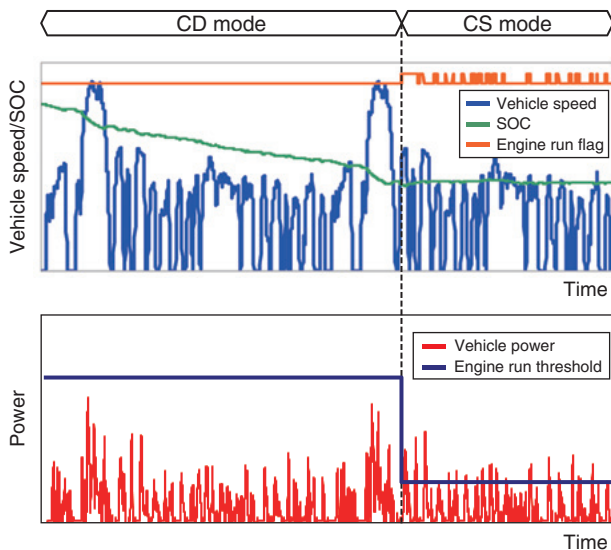


Fig. 3 Plug-in hybrid operation

モードと呼ぶ。

第2のモードは、エンジン動力をジェネレータで電力に変換し、この電力を用いてモータで走行するモード (シリーズハイブリッドとして作動するモード) で、これをハイブリッドドライブモードと呼ぶ。モータの消費電力に対するジェネレータの発電電力の過不足分は、Li-ion バッテリーから放電あるいは、Li-ion バッテリーへ充電される。

第3のモードは、エンジンと車軸がクラッチを用いて固定変速比で連結され、直接車輪をエンジンで駆動するモード (パラレルハイブリッドとして作動するモード) で、これをエンジンドライブモードと呼ぶ。この際、モータがアシストおよび充電機能を担い、Li-ion バッテリーからの放電 (アシスト) または、Li-ion バッテリーへの充電が実施される。

4. 制御システム

4.1. 制御システム構成

SPORT HYBRID i-MMD システムのブロック図を Fig. 5 に示す。エンジン、モータとジェネレータ内蔵の電気式 CVT、PCU、IPU で構成されるパワートレインコンポーネントの各制御ユニットは、冗長設計された Controller Area Network (CAN) で結合される。また電動サーボブレーキ⁽⁴⁾、エアコン用フル電動コンプレッサといった関連コンポーネントとも CAN で結合され、環境条件や運転条件に応じた協調制御を実施している。本章では特に燃費性能や制約条件下における走行性能に関連するパワーマネジメント制御について次節以降で説明する。

4.2. パワーマネジメント制御の主要目標

パワーマネジメントの主要目標としては

- (1) 各ドライブモードの燃費性能の向上
 - (2) ドライブモード切替えによる燃費性能の向上
 - (3) 制約条件下における走行性能の確保
- が挙げられる。

(1)、(2) においては運転者の加減速意図や、各コン

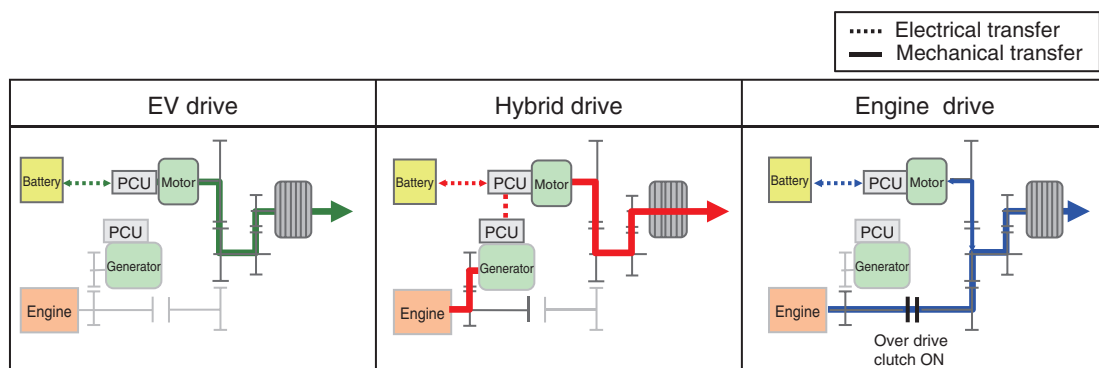


Fig. 4 SPORT HYBRID i-MMD operation modes

ポネントの制約と効率特性を考慮することで燃費性能を向上させている。(3)は例えばバッテリー電力制限といった制約が発生した場合、モータ出力に対する電力の過不足分をジェネレータ出力で補償するようなコンポーネント間協調制御をおこない走行性能を確保している。以降で上記目標達成のための制御手法について説明する。

4.3. 各ドライブモードの燃費性能の向上

SPORT HYBRID i-MMD システムにおいてエンジンを作動させるモードはハイブリッドドライブモードとエンジンドライブモードの2通りである。各モードにおける燃費性能は主にエンジンの熱効率が支配的となるため、いかにエンジンを高効率に運転し、システム全体の高効率化を図るかが燃費向上の鍵となる。以下に二つのモードでのエンジンオペレーション概要を説明する。

4.3.1. ハイブリッドドライブモードにおける高効率運転

ハイブリッドドライブモードにおいては、エンジンから車輪への機械的伝達経路がない。つまり車速(モータ回転数に比例する)と、エンジンおよびジェネレータとの間に回転数の制約がない。このため車速に対してエンジン回転数を任意に設定可能となる。従って、エンジン出力に対して一意に決まる BSFC ミニмумライン上にエンジン動作点をトレースさせる制御を基本とする。さらに Fig. 6 に示

すように青の BSFC ミニмумライン上でより高効率な動作点にエンジン出力を調整する。その際、モータ出力に対する発電電力の過不足分はバッテリーエネルギーにて補償される。

4.3.2. エンジンドライブモードにおける高効率運転

エンジンドライブモードにおいては、固定減速ギヤを介してエンジンが車輪と結合されるため、車速に対してエンジン回転数が一意に決まる。平坦路のクルーズ走行を想定した場合のエンジン回転数とトルクの関係は Fig. 6 の点線となる。エンジンドライブモードは高速クルーズ走行領域

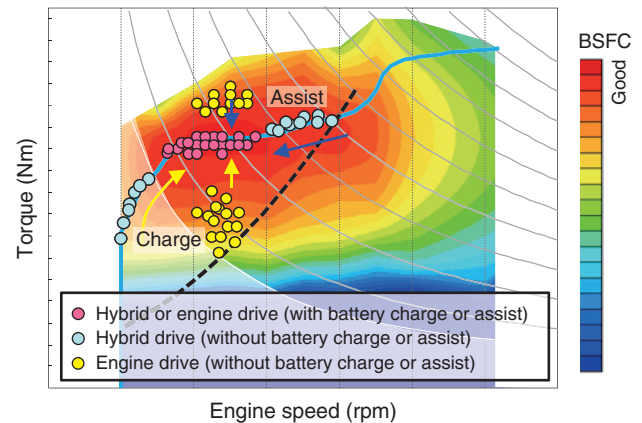


Fig. 6 Engine operating point

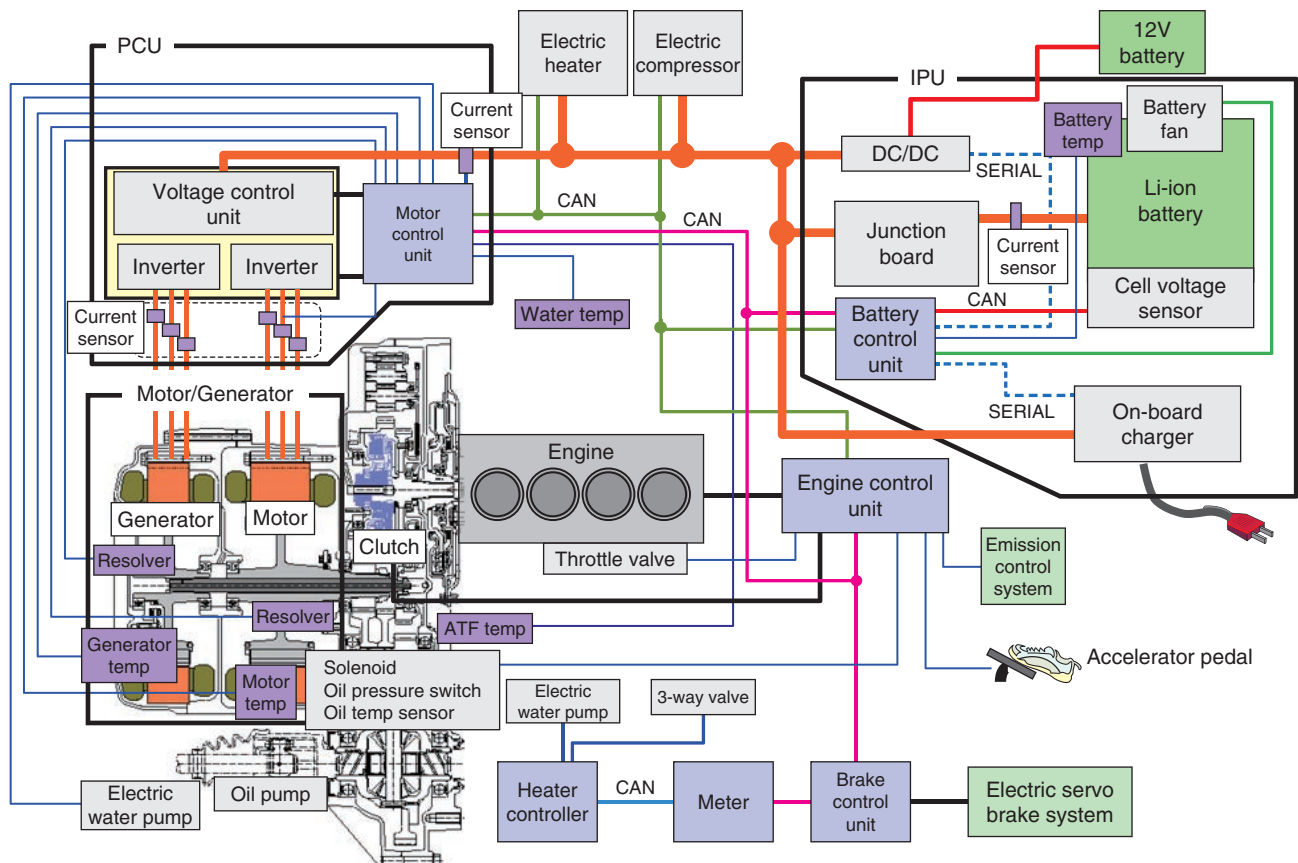


Fig. 5 Block diagram of SPORT HYBRID i-MMD system

で活用されるが、平坦路走行を想定した場合 BSFC ミニмумラインに対してエンジン動作点が低トルク側にかい離する。この場合、エンジンがより高効率な動作点になるようエンジントルクを増加させるとともに、このトルク増加分をモータの回生作動で吸収する。逆に BSFC ミニмумラインに対してエンジン動作点が高トルク側にかい離する状況では、エンジントルクを減少させ、差分をモータの駆動で補う。このようにモータ回生、駆動により、エンジン動作点をより高効率領域に拘束する制御をおこなう。

4.4. ドライブモード切替えによる燃費性能の向上

車両の燃費向上には 4.3. 節のエンジン熱効率向上と同時に、エンジン出力から車軸出力へのエネルギー伝達効率を高めシステム全体の高効率化を図る必要がある。SPORT HYBRID i-MMD システムではドライブモード切替えにより、高効率化を達成している。

Fig. 7 に CS モード時の車速に応じたドライブモード切替えの概要を示す。また Fig. 8 に駆動力線図とドライブモード動作範囲を示す。発進から市街地走行等の低車速走行時は主に EV ドライブモードを選択し、エンジン低負荷運転による燃費低下を回避する。中車速走行時はエンジン熱効率と Li-ion バッテリ充放電損失のバランスを考慮し EV ドライブとハイブリッドドライブ、あるいは EV ドライブとエンジンドライブを適宜切り替える間欠運転をおこなうことによって燃費改善を図る。高車速走行時はハイブリッドドライブとエンジンドライブにおいてエネルギー伝達効率が高いモードを適宜選択する。

4.4.1. EV ドライブとハイブリッドドライブ (エンジンドライブ) の切り替え

EV ドライブが選択可能な走行出力領域では間欠運転と呼ばれるモード切替えを適宜おこない、ハイブリッドドライブ (またはエンジンドライブ) の際に Li-ion バッテリへ充電しつつ、蓄えられた電気エネルギーを用いて、後で EV ドライブに切り替える。Fig. 9 に EV ドライブとハイブリッ

ドドライブの切り替えによる燃費改善効果を示す。

走行出力が小さい領域では、エンジン熱効率と Li-ion バッテリ充放電損失のバランスから、常時エンジン作動 (Fig. 9 図中の Battery charge 0 kW のライン) させた場合に対して、間欠運転をおこなうことで最大 50% 程度の燃費改善効果が得られることがわかる。一方走行出力が大きい領域においては間欠運転による燃費改善効果は減少し、逆に燃費が低下する傾向となることがわかる。このように燃費改善効果を考慮し EV ドライブの出力範囲を決定している。

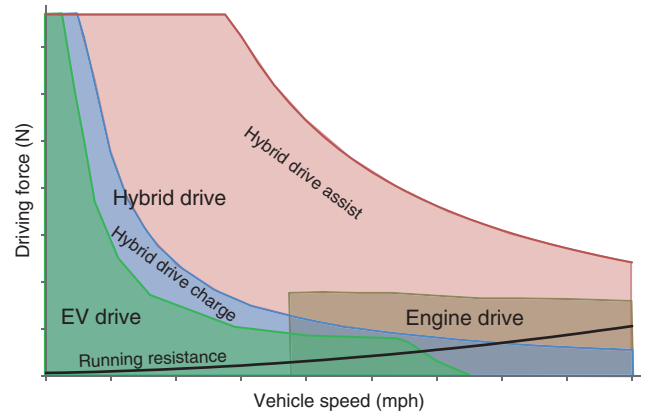


Fig. 8 Operating area of three driving modes (CS mode)

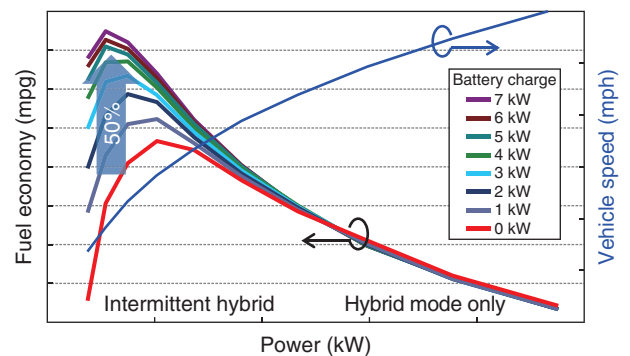


Fig. 9 Fuel economy enhancement of intermittent operation

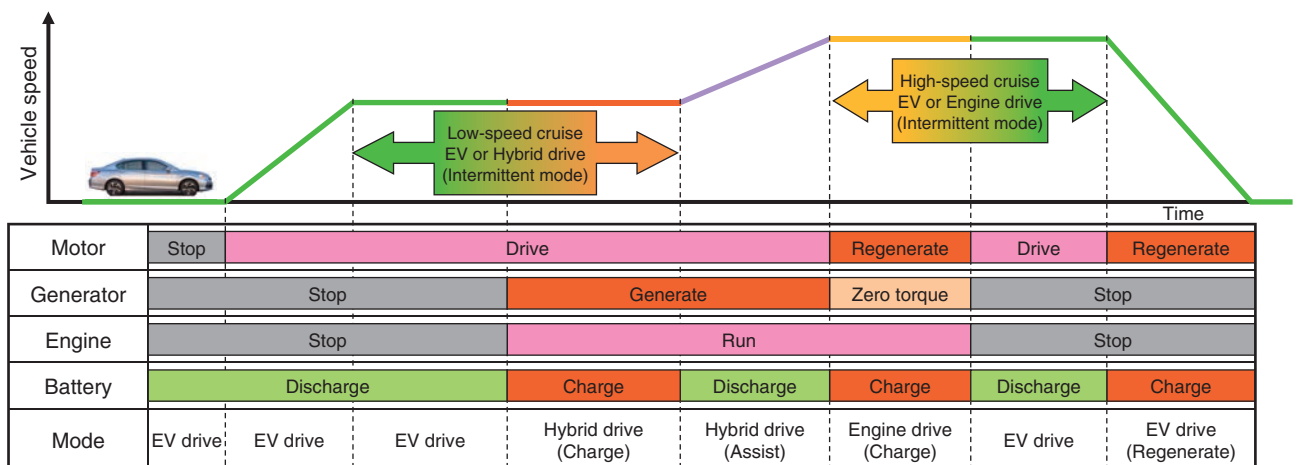


Fig. 7 CS mode operation

4.4.2. ハイブリッドドライブとエンジンドライブの切り替え

ハイブリッドドライブとエンジンドライブの燃費比較を Fig. 10 に示す。

Fig. 10 図中の有色領域はエンジンドライブの方が燃費が良い領域で、白色領域はハイブリッドドライブの方が燃費が良い領域を示している。黒ラインが平坦路走行時の走行抵抗を示している。クルーズ走行から緩加速領域ではエンジンドライブモードの方が、ハイブリッドドライブモードよりエネルギー伝達効率が高いため、最大で 12% 燃費性能が良いことがわかる。一方で走行負荷がより高い領域ではハイブリッドモードの方が、燃費性能が良いことがわかる。これらの関係に基づきハイブリッドドライブモードとエンジンドライブモードの切り替えを実施する。

4.5. 制約条件下における走行性能の確保

SPORT HYBRID i-MMD システムはさまざまなコンポーネントで構成されており、各コンポーネントが信頼性確保のための制約を有する。制約条件としてはモータのトルク制限、ジェネレータのトルク制限、バッテリー電力の

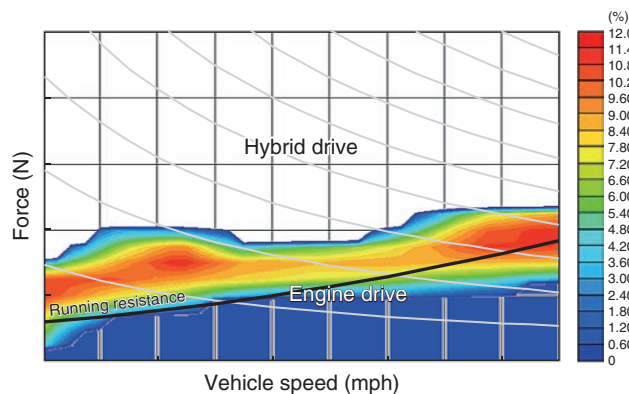


Fig. 10 Comparison of fuel consumption of hybrid drive and engine drive

制限等が存在する。特にバッテリー電力の制限については Li-ion バッテリー耐久性確保の観点から高精度な制御が求められる。またその制限がシリーズハイブリッドを採用するシステムでは走行性能に大きく影響を与えることがわかっている。よって本節ではバッテリー電力制限を代表にとり、さまざまな環境条件、運転条件に対応した各コンポーネントの協調制御について説明する。

パワーマネジメント制御では運転者のアクセルやブレーキといった加減速意図と各コンポーネントから出力やトルクの制限情報を得て、制限範囲内で適切な協調出力制御を実施している。低温環境下などバッテリー電力が制限されバッテリー電力のみで加減速意図を満足できない状況では、パワーマネジメント制御はハイブリッドドライブモードを選択し、モータとジェネレータとエンジンの各出力を高精度にバランスさせバッテリー電力制限と走行性能を両立させる。本制御のブロック図を Fig. 11 に示す。

パワーマネジメント制御は運転者の加減速意図とモータのトルク制限要求から目標車両駆動力を算出する。次に目標車両駆動力から算出される目標モータ出力、およびエネルギーマネジメント制御から算出される目標バッテリー電力の和に一致するような目標エンジン出力を算出する。目標エンジン出力はバッテリー電力制御器により適宜修正される。次に修正された目標エンジン出力から目標エンジン回転数と目標エンジントルクを算出する。ここで回転とトルクの目標値はエンジン効率が最大となる点を選択する。最終的にはバッテリー電力制限を含めたさまざまな制約条件を考慮しエンジン出力とジェネレータ出力とモータ出力を修正する。本制御器構成で運転者の加減速意図、バッテリー SOC の収束性、バッテリー電力制限性能、その他コンポーネントの制約をバランスさせている。

さらに上記で算出したモータやジェネレータの出力を、極低温下などバッテリー電力が大きく制限される時や急加減速時といった電力の急峻な変動時でもバッテリー電力制限を

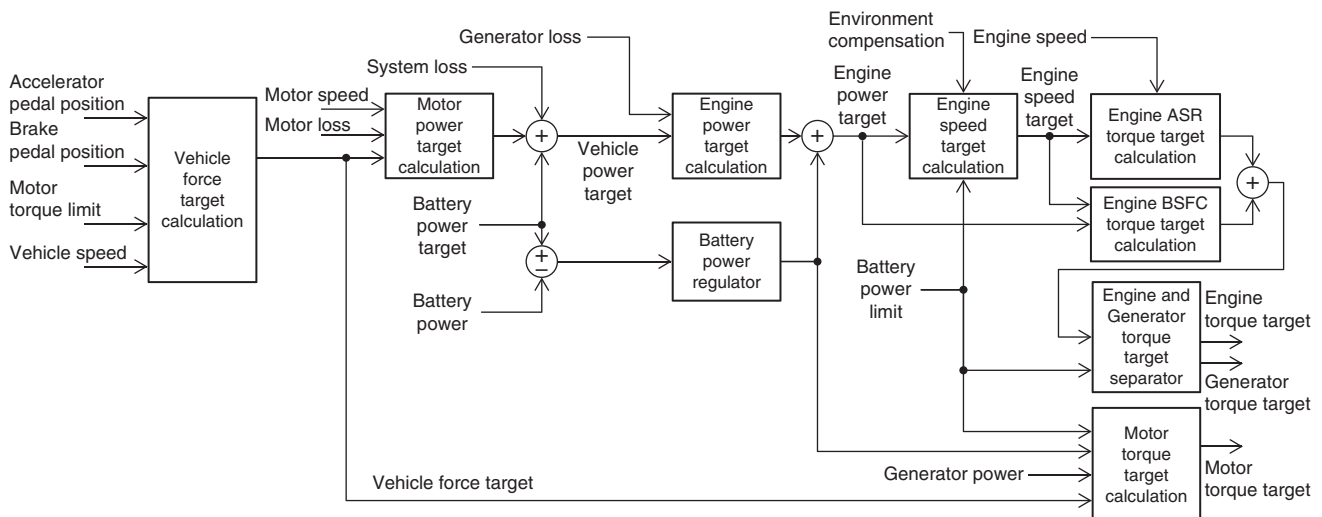


Fig. 11 Power management control

満足できるよう高精度、高応答に補正をおこなう。

極低温下においてバッテリー電力はバッテリー耐久性確保のために厳しく制限される。この制限下で走行性能を維持するにはモータとジェネレータが 100 kW 超の出力を出しつつも、その電力収支を数 kW 以下のバッテリー電力制限内に収める高精度な制御が必要である。また雪道などの低 μ 路面における急加減速ではホイールスピンやタイヤロックが発生しモータ回転数の変動によりモータ出力が急激に変化するが、当該状況においても同様に制限内に収める高応答な制御が要求される。以降高精度と高応答を両立した出力補正手法について説明する。

4.5.1. バッテリ電力推定

高応答なバッテリー電力制御には遅れや無駄時間の少ないバッテリー電力情報が必要なことから高速なバッテリー電力推定をおこなう。バッテリー電力は Li-ion バッテリーの電圧センサと電流センサから計測可能である。しかしセンサの遅れ要素、バッテリーのコンデンサ特性、PCU 内のコンデンサ、リアクトル特性、および各制御ユニット間の通信遅れ等がある。そのため制御ユニットの認識するモータとジェネレータの電力変動と、バッテリー電力変動間には遅れ特性と無駄時間特性がある。高速な制御応答要求に対し、その遅れと無駄時間特性は無視できないため、間接的にモータとジェネレータの電力およびその他損失情報からバッテリー電力を推定する。Fig. 12 に本システムの高電圧コンポーネントを示す。

高電圧コンポーネントにおいて、バッテリー電力 P_{bat} はモータやジェネレータへの投入電力 P_{mot} , P_{gen} と、モータやジェネレータのインバータ損失 P_{invmot} , P_{invgen} と、昇圧損失 P_{vci} と、DC/DC コンバータ損失 P_{dedc} と、エアコンとヒータ損失 P_{ac} の総和となる. 従って定常的には以下の式 (1) に示す電力方程式が成立する.

$$P_{bat} = P_{mot} + P_{gen} + P_{invmot} + P_{invgen} + P_{vsc} + P_{dc/dc} + P_{ac} \quad (1)$$

式(1)よりバッテリー電力はモータとジェネレータの電力から各種損失分を補正することで推定可能なことがわかる。モータやジェネレータへの投入電力は相電流センサと昇圧後電圧センサにより計測可能である。モータやジェネレータのインバータ損失および昇圧損失は所定のパラメータから決定されるノミナル値を用い推定可能である。

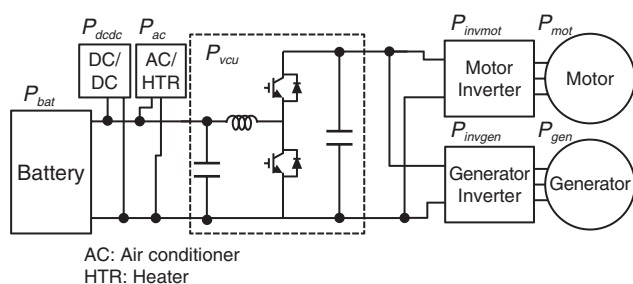


Fig. 12 High-voltage component

DC/DC コンバータ損失, エアコンとヒータ損失は各制御ユニットから CAN で情報を取得する. これらの情報からバッテリー電力を推定する制御器とした. 本制御器構成を Fig. 13 に示す.

4.5.2. バッテリ電力制御のための出力補正

前項で算出した推定バッテリー電力を使用して高応答かつ高精度なバッテリー電力制御をおこなう。バッテリー電力変動は主にモータやジェネレータの電力変動に起因すること、および電力はトルクと相関があることに着目し、パワーマネジメント制御が算出したモータとジェネレータのトルク指令値を補正することでバッテリー電力を制御する構成を選択した。また推定バッテリー電力は温度特性や製造誤差等に起因する誤差を有しているため、その誤差を補正する必要がある。よって実バッテリー電力と推定バッテリー電力の偏差を算出し、その偏差からバッテリー電力制限値を補正することで誤差影響を除去した。ジェネレータトルク補正側を例に本制御器構成を Fig. 14 に示す。

Fig. 14 に示すように、バッテリー電力とバッテリー電力制限値間には図中の青ラインで示す閉ループが構成される。従ってバッテリー電力とバッテリー電力制限値間のレギュレータ制御器 $G(s)$ を付加しパワーマネジメント制御が算出したモータトルクおよびジェネレータトルクを補正すればバッテリー電力は電力制限値範囲内に収束可能である。

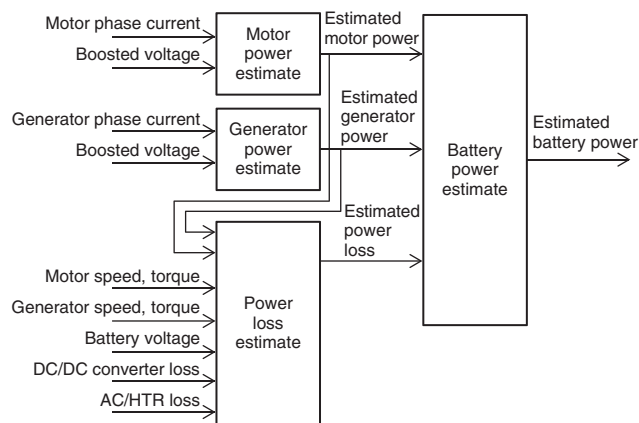


Fig. 13 Battery power estimator

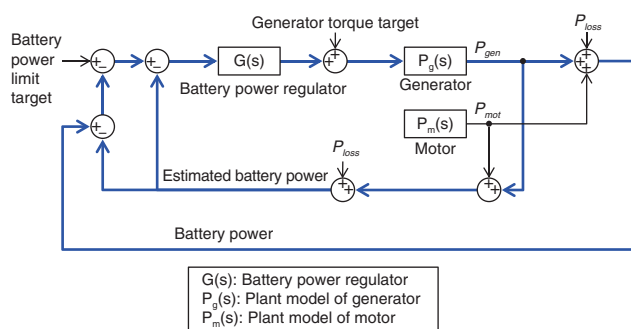


Fig. 14 Closed loop of battery power limit to battery power

5. 実車達成性能

Fig. 15 に既存ガソリンエンジン車に対する SPORT HYBRID i-MMD Plug-in システムの燃費改善効果を示す。既存ガソリンエンジン車に対し EPA の燃費計測モードである City モードで 104%, Highway モードで 35%, Combined モードで 70% の燃費を改善し 46 mpg を達成した。Fig. 16 に 70% の燃費改善効果の内訳を示す。ハイブリッド化に伴う 39% の燃費改善に本制御は寄与した。また CD モードでは 13 mile の EV レンジと 115 MPGe の燃費を達成している。

Fig. 17 に制約条件 (バッテリー電力制限) 下における加減速を含む高速走行 (US06 モード) 結果を示す。バッテリー電力制限下においてジェネレータ発電量を調整することでモータ出力に対する電力不足分を補い、バッテリー電力を制限範囲内に収束させつつ走行性能を維持可能なことを確認した。また Fig. 18 にホイールスピンや急ブレーキといっ

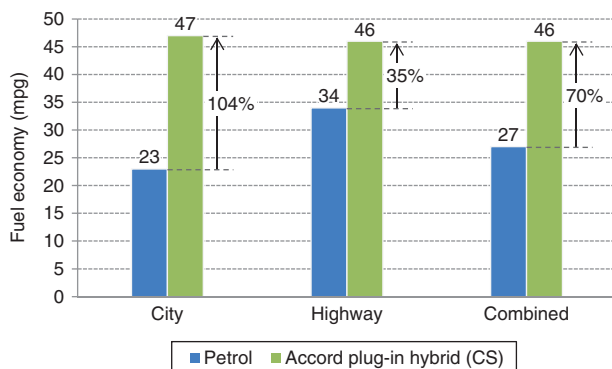


Fig. 15 Comparison of fuel economy

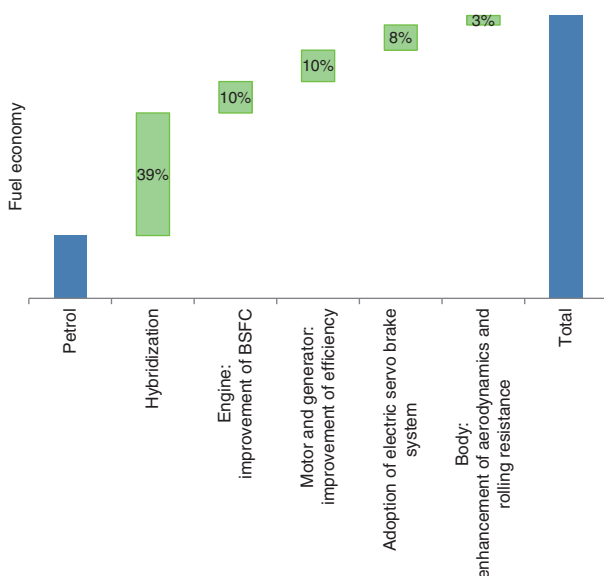


Fig. 16 Contributions to fuel economy enhancement of proposed SPORT HYBRID i-MMD Plug-in system

たモータ出力が急変する時のバッテリー電力挙動を示す。当該状況においても同様にバッテリー電力を制限範囲内に収束させていることを確認した。上記条件ではモータとジェネレータは 100 kW を超える出力をしているが、バッテリーへの入出力電力は数 kW 以下に収束させている。

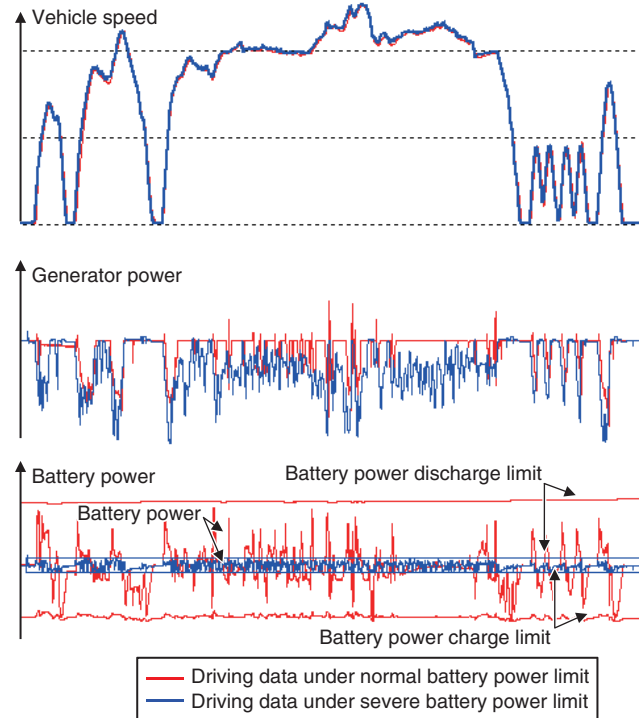


Fig. 17 Power management in US06 mode

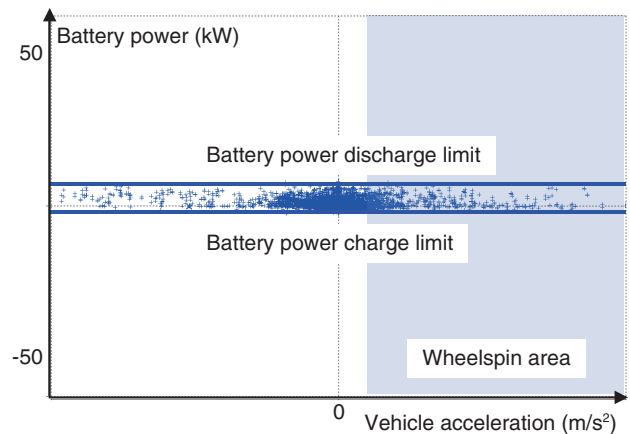


Fig. 18 Vehicle acceleration and battery power

6. まとめ

2 モータハイブリッドシステム SPORT HYBRID i-MMD 用制御システムを開発し、2014 年モデル Accord に搭載することで以下の性能を達成した。

(1) 三つのドライブモードを状況に応じて適切に選択し、

エンジン熱効率と、エネルギー伝達効率を向上することにより、39%の燃費向上に寄与した。また以下の燃費性能を達成した。

EV レンジ 13 mile

CD 燃費 115 MPGe

CS 燃費 46 mpg

- (2) バッテリ電力制限時の走行において、各コンポーネントの協調制御により、バッテリ電力を制限範囲内に収束させながら走行性能を維持することを可能とした。

参考文献

- (1) Higuchi, N., Sunaga, Y., Tanaka, M., Shimada, H.: Development of a New Two-Motor Plug-In Hybrid System, SAE 2013-01-1476(2013)
- (2) Yonekawa, A., Ueno, M., Watanabe, O., Ishikawa, N.: Development of New Gasoline Engine for ACCORD Plug-in Hybrid, SAE 2013-01-1738(2013)
- (3) 黒木次郎, 大塚浩: SPORT HYBRID i-MMD システム用のモータと PCU の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.2, p.41-47
- (4) Ohkubo, N., Matsushita, S., Ueno, M., Akamine, K., Hatano, K.: Application of Electric Servo Brake System to Plug-In Hybrid Vehicle, SAE 2013-01-0697(2013)

■ 著 者 ■



井手 博 仁



須 永 義 弘



樋 口 成 智