

ハイブリッドカー「インサイト」用 モータアシストシステムの開発

Development of the Motor Assist System for a Hybrid Car – INSIGHT

落 合 志 信*

Shinobu OCHIAI

靄 見 隆 史*

Takafumi TSURUMI

内 堀 憲 治*

Kenji UCHIBORI

鈴 木 実*

Minoru SUZUKI

原 一 広*

Kazuhiro HARA

要 旨

エンジンを主動力源とし、モータをクランク軸直結としたコンパクトで搭載性に優れたモータアシストシステムを開発し、インサイトに搭載した。そのシステムは制動エネルギーの回収、アイドリングの停止、エンジンのアシスト、12V 系負荷分の発電等の機能を有し、走行モードに対応したエネルギーマネジメントにより燃費向上に寄与した。また、3気筒エンジン特有のアイドリング振動のモータによる抑制制御を行なうとともに、二つの駆動力源を協調させるためアシスト・回生トルクの過渡状態での制御についても考慮して乗り心地の向上を実現した。

ABSTRACT

A motor-assist system has been developed and employed for the 'Insight' hybrid car. The system consists of an internal combustion engine as a primary power source, and a motor placed around the engine crankshaft. Such construction makes the system volume significantly small and offers more flexibility for a power plant layout.

The system's functions include absorption of braking energy, idling-stop, driving power assistance, and power supply for the 12V electrical system. A proper energy management method for various driving mode has been established by combining these functions and fuel economy is significantly improved as a result. As other control features, an active motor vibration control compensates idling vibration that is unique to 3-cylinder engine, and sophisticated transient torque control between assist and regenerating modes harmonizes the two power sources' characteristics to ensure better driving comfort.

1. まえがき

地球温暖化現象の要因とされる CO₂(二酸化炭素)の中で車からの排出量削減が昨今の自動車産業の重要な課題となっているが、その対応の一つとしてエンジンと電気モータを組み合わせたパワープラントのハイブリッド化による燃費向上への取り組みがある。従来のガソリンエンジン車では減速する時に、走行中の運動エネルギーをブレーキにより熱エネルギーとして捨てている。またアイドリング中の燃料消費は燃費悪化につながる。

これに対しハイブリッドシステムは、

- 減速エネルギーの回収
- モータによる再始動を前提としたアイドリング停止
- 高効率領域での充電、及びアシスト

が可能であり、そのシステム形態としては電気自動車をベースとしてエンジンによる発電装置を追加したシリーズ方式、エンジンをベースとしてモータを補助動力として付加したパラレル方式、またはその中間をねらったものなどさまざまな方式が提案されてきている^{(1), (2)}。

2. 開発のねらい

ハイブリッドシステムは前述のようにエネルギーを有効利用することを可能とするが、システム重量の増加により逆に燃費を低下させる要因も持ち合わせる。

そこでエネルギーの有効利用と重量のバランスを保つことに主眼を置いたハイブリッドシステムを開発し、IMA (Integrated Motor Assist) システムと称した。

また、二つの駆動力源を協調させたスムーズな走りや、スムーズな再始動などによる高品位なアイドリング停止機能を実現し、さらにエネルギーを最大限に利用するためのシステム制御の構築を図った。

3. システム構成

開発にあたってシステム構成と部品配置、及び部品設計は以下の3点に留意した。

第一に燃費を良くするために空力性能の向上が必要であるが、このためには車体形状の制約からコンパクトな部品配置とシステムの徹底的な合理化が求められる。

第二に同じく燃費向上のためには部品自体の軽量化も必要となる。

第三に高圧系を持つために通常使用時はもちろんのこと、衝突やメンテナンス時にも感電防止等の安全を確保しなければならない。

これらの要求に対して配線を極力短くし、高圧安全を確保するため Fig.1 及び Fig.2 に示すように IPU(Integrated Power control Unit)として高圧機器をクラッシュプルゾーン外の車両後部に集中配置した。

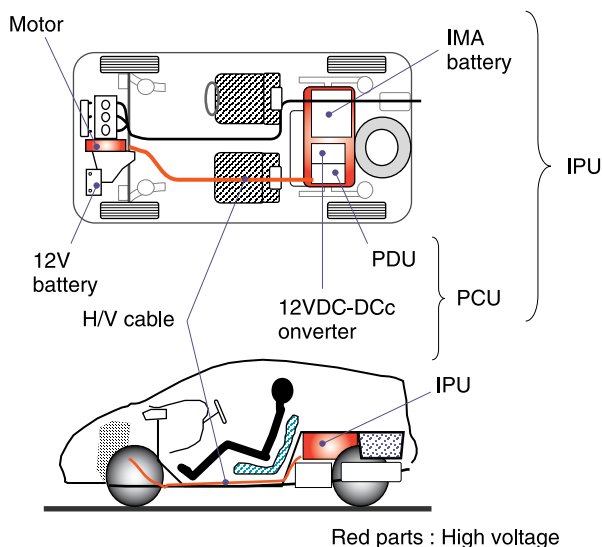


Fig.1 IMA package

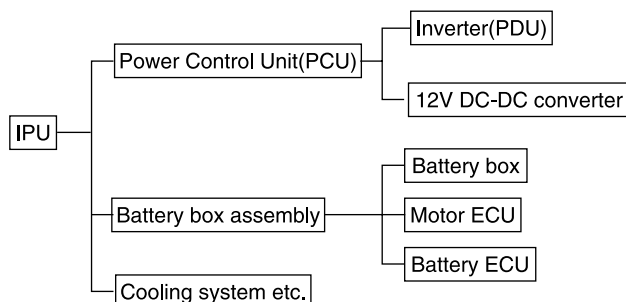


Fig.2 IPU component

さらに IPU 内の冷却は水冷よりも軽量な強制空冷とし、冷却通路への水等の進入を防ぎつつ通路抵抗を極力抑えるような冷却系の設計を行った。

モータはクランク軸直結でエンジンとトランスミッションの間に配置される薄型のものを開発した。

3.1. エンジン

主動力源であるエンジンには燃費向上のために多くの新しい技術が盛り込まれている⁽³⁾。

排気量 1.0L のリーンバーン方式とし機械損失低減などの観点から3気筒とした。さらに燃焼効率の向上のために従来の VTEC 希薄燃焼技術を進化させた燃焼室形状を採用した。

また、軽量化のためにオイルパンのマグネシウム化やインテークマニホールド、ヘッドカバー等の樹脂化、さらにエキゾーストマニホールドをアルミニウム化してシリンダヘッドに一体化するなどの技術が投入されている。

3.2. モータ

モータは効率の点で有利な交流同期電動機(DC ブラシレスモータ)を採用し、軸受けをなくして機械損失を低減させ、コンパクト化のためにロータをエンジンのクランクシャフトに直結する構造とした。

動力性能を 1.5L ガソリン車と同等とするため、アシストするモータの出力は Table 1 に示すように最大トルク 49Nm/1000rpm, 最高出力 10kW/3000rpm とした。またエンジンルームに収めるため、エンジンのコンパクト化を行なうと共にモータ側も高耐熱ネオジウム系マグネットの採用等により、Fig.3 に示すように熱の点で厳しいエンジンとトランスミッションの間の幅 60mm に収め、自然空冷とした。

Table 1 IMA specifications

Engine specifications	
Construction	Liquid-cooled 3-cylinder in-line
Valve train	Chain-driven SOHC 2intake/2 exhaust valves
Capacity (cc)	995
Bore x Stroke (mm)	72.0 x 81.5
Compression ratio	10.8
Max. power (PS/rpm)	70/6 700
Max. torque (kgm/rpm)	9.4/4 800
Motor specifications	
Electric current	AC
Rated voltage (V)	144
Max. power (kW/rpm)	10.0/3 000 (MT)
	9.2/2 000 (CVT)
Max. torque (Nm/rpm)	49.0/1 000



Fig.3 IMA motor

3.3. バッテリー

バッテリーは、Table 2 及び Fig.4 に示すようにハイブリッド車専用 Ni-MH バッテリーを採用し、さまざまな使用条件を踏まえて、アシストと回生の電力量から最適なバッテリー容量を決定した。

バッテリーの冷却、加温のためのファンモータはメンテナンス性や車内騒音低減のためブラシレスタイプとし、さらに回転数を High と Low の2段切り替えとした。

またバッテリーボックス上面にモータ制御やバッテリー残容量検出等を行なう ECU(Electronic Control Unit)を備えている。

Table 2 Battery specifications

Type	Nickel metal hydride (Ni-MH)
Cell voltage (V)	1.2
Quantity (cells)	120 (6cells × 20modules)
Connecting method	In series
Capacity (Ah)	6.5 (3-hour discharge rate)

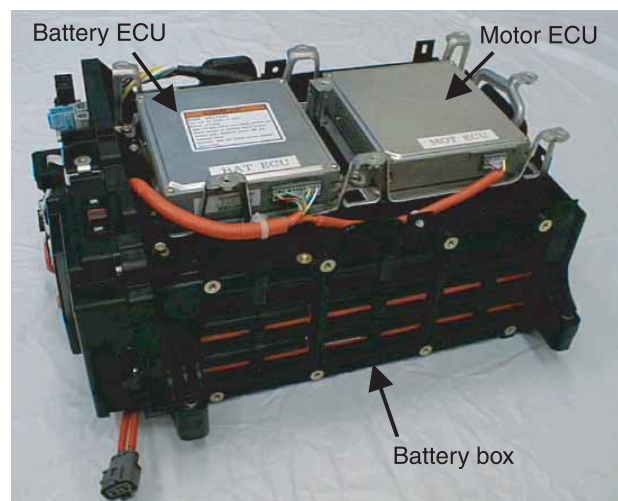


Fig.4 Battery box assembly

3.4. パワーコントロールユニット

パワーコントロールユニットは駆動及び回生用高効率 PDU(Power Drive Unit)と 12V 電源発電用 DC-DC 降圧コンバータとを Fig.5 に示すように冷却用ヒートシンクケー

スを挟み込む形で配置し、強制空冷構造とすることでコンパクト化と効率の高い冷却を可能にした。

また PDU の小型軽量化のために6個のモータ駆動用スイッチング素子を一つのモジュールに統合した。

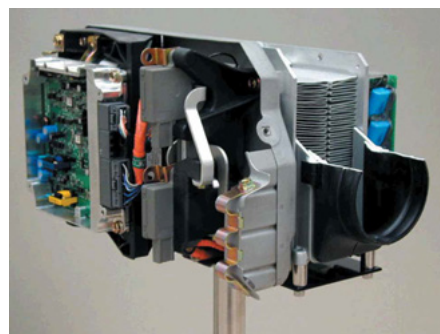


Fig.5 PCU (Power Control Unit)

3.5. ECU

モータ ECU とバッテリー ECU はフレームにマグネシウムを使うなどによりアルミニウムフレームを用いた ECU に比べ約 1/2 の重量とした。

以上のようにコンパクトな部品配置と部品の軽量化、および冷却系の合理化により Fig.6 及び Fig.7 に示すようなパッケージが可能となり、IMA システム全体として車両重量の 10%以下である 80kg 以下を達成し、IPU のリア集中パッケージにより構造自体に衝突を含む高圧安全機構を持たせることができた。



Fig.6 IMA power unit



Fig.7 Rear layout of IMA system

4. 制御システム

4.1. 要求機能

このシステムに求められる基本機能としては減速時のエネルギー回収、アイドリング停止、加速時のエンジン出力に対するモータアシスト及び 12V 系負荷分の発電がある。

また、ドライバの操作に対してモータの作動が自然であること、考え方として故障時でもシステムの切り離してエンジンのみで従来の走行ができることを掲げた。

これらの機能を実現するための最小システムとして Fig.8 のように構成した。

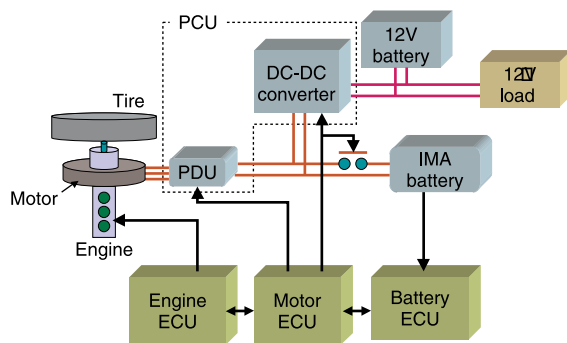


Fig.8 IMA System block diagram

各 ECU の機能を以下に示す。

(1)エンジン ECU

エンジン制御、制御モード判断、アシスト/回生量計算、アイドリング停止判断、故障検出等。

(2)モータ ECU

モータ制御(アシスト/回生、エンジン始動)、制御モード判断、高圧配電制御、バッテリー保護制御、アイドリング振動低減制御、制御状態表示。

PDU 冷却、DC-DC コンバータ冷却、故障検出等

(3)バッテリー ECU

SOC(State Of Charge: 充電レベル)計算、バッテリー保護要求出力、温度コントロール、故障検出等

4.2. 走行状態とエネルギーの流れ

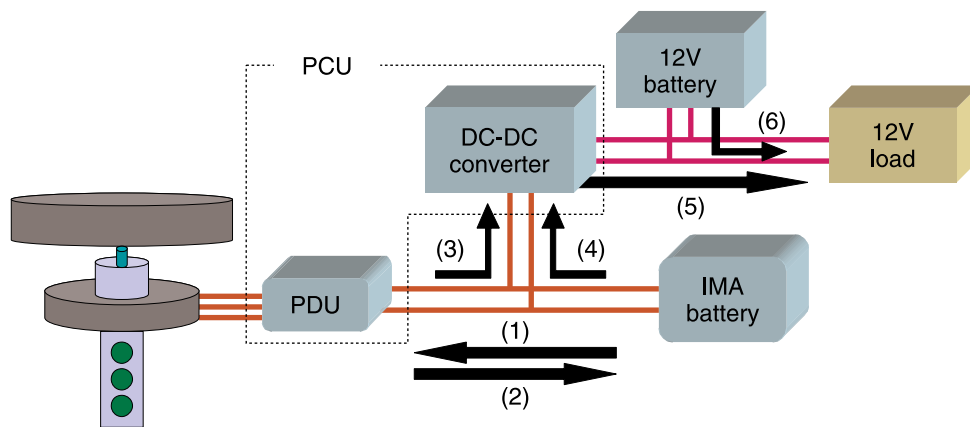
IMAシステムはエンジン回転数、車速、スロットル開度、ギアポジション、SOC 等の車両情報から IMA 制御モードとモータのアシスト/回生量を決定している。

IMA システムでのエネルギーの流れは、Fig.9 のように全部で6方向ある。

(1)モータアシスト

(2)IMA バッテリー充電

(3)12V 負荷分発電



IMA mode	Condition	(1) Assist	(2) IMA battery Charging	(3) 12V from Motor	(4) 12V from IMA battery	(5) 12V from DC-DC	(6) 12V from 12v Battery	Energy pattern
1. Assist	Normal	●			●	●		Pattern 1
	Low SOC			●		●		Pattern 3
2. Decelerate	Normal		●	●		●		Pattern 2
	High SOC			●		●		Pattern 3
3. Cruise	Normal		●	●		●		Pattern 2
	High SOC			●		●		Pattern 3
4. Idling	Normal		●	●		●		Pattern 2
	High SOC			●		●		Pattern 3
5. Idling stop					●	●		Pattern 4
6. Engine start	Ignition ON	●					●	Pattern 5
	Idling stop	●			●	●		Pattern 1
	Starter						●	Pattern 6

Fig.9 Energy flow of the IMA system

- (4)12V 負荷分を IMA バッテリから供給
(5)12V 電力を DC-DC コンバータで供給
(6)12V 電力を 12V バッテリから供給

この6方向のエネルギーの流れを走行モードと SOC で整理すると6つのエネルギーパターンに分類される。

以下に各エネルギーパターンでどのエネルギーの流れがあるかを説明する。

パターン1：

加速時のアシスト、アイドリング停止後のエンジン始動
など IMA バッテリからモータを駆動する。

----- (1), (4), (5)

パターン2：

減速エネルギーの回収, クルーズ, アイドリング中の充電. ----- (2), (3), (5)

パターン3：

IMA バッテリーに充電する必要のない時(SOC 上限等)に
DC-DC コンバータ発電分(12V 系負荷分)のみ供給する。

----- (3), (5)

パターン4：

アイドリング停止中に 12V 系の負荷分を IMA バッテリから供給する。----- (4), (5)

パターン5：

IMA モータでのエンジン始動. 12V 負荷分は 12V バッテリから供給する. (1), (6)

パターン6：

極冷間時等IMA モータによる始動ができない時には一般ガソリン車と同様にスタータによりエンジンを始動する。

----- (6)

以上のように走行状態により決まるエネルギーの流れを Fig.10 に示す IMA メータに表示する.

SOC メータはバッテリーの SOC を 20 セグメントにより表示する。アシスト／充電メータはアシスト／充電電力をリアルタイムに表示することでIMAの作動状況をドライバーに伝える。

4.3. エネルギーマネジメント

ハイブリット車においてモータによる駆動／回生を機能させるためにはSOCを一定の範囲に保つ必要がある。IMAでは12V負荷の量によらず駆動／回生力制御とSOCとのバランスを保つために走行状態により以下のエネルギーマネジメントを行なった。

(1)アシスト／減速モード

車両の駆動，制動力が重視されるアシスト，減速モードにおいては，12V 負荷の量によらず PDU の DC 部で要求通りの電力になるように制御する。

(2)クルーズ/アイドリングモード

モータ出力よりも、バッテリー電力収支が重視され、SOC 変動を最小限に抑える必要があるクルーズ/アイドリングモードでは、バッテリー入力部の DC 電力を制御する。この手法によりモータの回生電力をバッテリーの充放電損失を最小限に抑え車体系の 12V 負荷分に供給することが可能となる。Fig.11 で例を示すと充電要求が 2kW で、DC-DC コンバータ消費 0.5kW の時はバッテリー側の電力が 2kW になるようにフィードバックすることで結果的にモータは 2.5kW の発電をすることになり、DC-DC コンバータ消費分を供給できる。

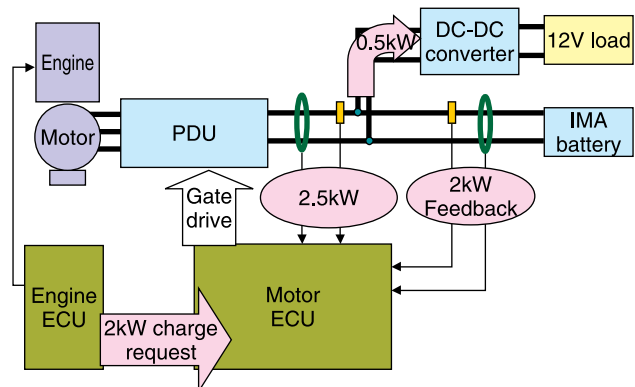


Fig.11 Energy flow for conventional electoric load

(3) アイドリング停止モード

車両の停止中にアイドリングを止める事により不要な燃料消費を避ける事ができる。アイドリング停止モードにおいては IMA バッテリから DC-DC コンバータを介し 12V 負荷による消費電力を供給する。

(4)エンジン始動モード

IMA モータにより減速時に発生する回生エネルギーを活用してエンジン始動を行なう。IMA モータはスタータモータに比べ耐久性に優れ、始動時間の短縮、及び音と振動の低減を可能にする。短時間でエンジン回転数をアイドリング回転まで上昇させるために Fig.12 のトルクパターンとした。冷間始動時のエンジ

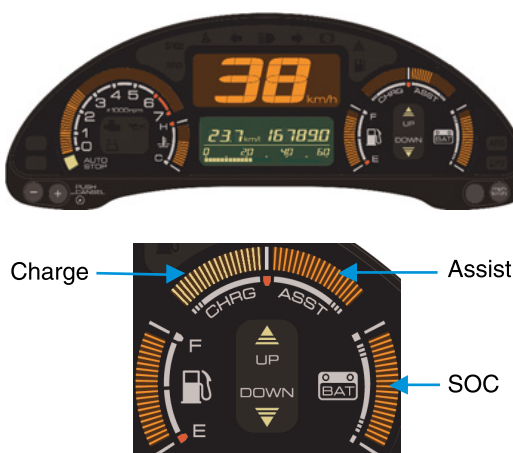


Fig.10 Hybrid meter

ン回転数の上昇の様子をスタータモータと IMA モータそれぞれについて Fig.13 と Fig.14 に示す。IMA モータでのエンジン始動により、アイドリング停止後のスムーズな再始動が実現できた。

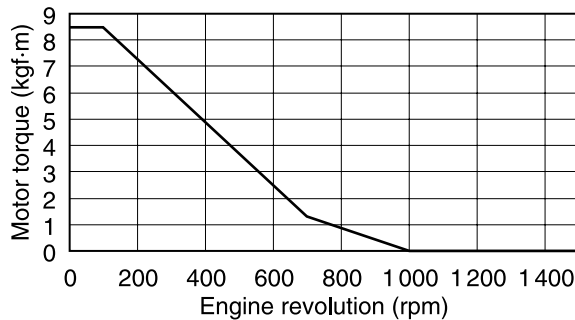


Fig.12 IMA motor torque at engine start

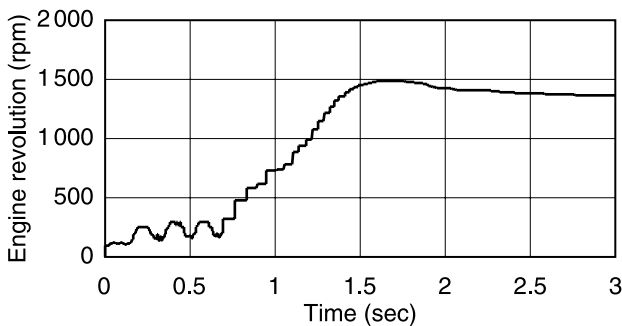


Fig.13 Engine revolution chart (starter motor)

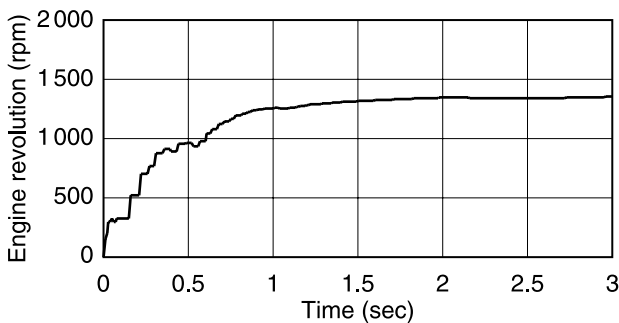


Fig.14 Engine revolution chart (IMA motor)

4.4. モータ出力制御

車体挙動の制御性向上にはモータ出力制御の応答性と安定性の確保が求められる。要求出力は車速、エンジン回転数、SOC 等の条件により決定されるが、モータの実出力の追従性を考慮し、実指令値の算出はオープン制御とフィードバック制御の切り換えによって行っている。

Fig.15 に示すように現在の実出力と要求出力との差が大きい時は規定の幅まで単位時間あたりのトルク変化量の大きなオープン制御を行い、その後は DC-DC コンバータ分を含めた電力フィードバック制御により目標値まで制御を行う。

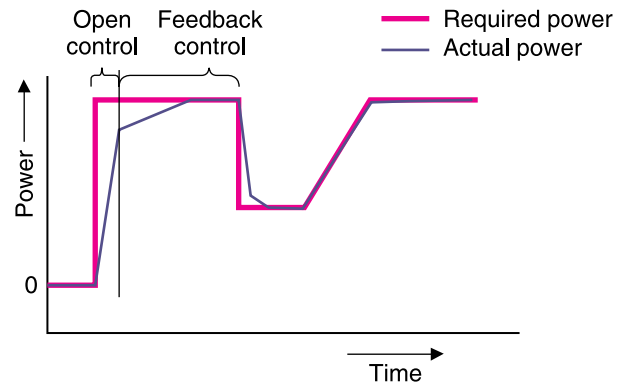


Fig.15 Method of torque feedback

フィードバック制御においても、要求出力の変化の大きさによりフィードバックゲインの切り換えを行なう。変化が大きい時は過渡状態と判定し、フィードバックゲインを大きくし応答性の向上を図る。

過渡状態判定時以外のフィードバック処理においても、減速、アシスト、クルーズ、アイドル等の制御モードによりフィードバックのゲインを Table 3 のように切り換えることにより、車体挙動を安定させることができた。

Table 3 Feedback gain of control mode

Control mode \ Gain	Deceleration	Assist	Cruise	Idling
Gain of proportional control	Kp1	Kp2	Kp3	Kp4
Gain of integral control	Ki1	Ki2	Ki3	Ki4
High Middle Low				

5. モータ制御によるアイドリング振動低減

インサイトは3気筒エンジンを搭載しているためエンジン回転数の $1.5 \times n$ 次の振動が発生する。そのため IMA システムではモータがクランク軸直結であることを利用し、主成分である 1.5 次振動に対して Fig.16 に示すようにそのトルクとは逆相のトルクを印加して、アイドリング時の車体振動の低減を行っている。これを制振制御と呼んでいる。

Fig.17 には実際のエンジントルクと、その 1.5 次成分及び制振制御により印加すべきトルクの例を示す。この図からもわかるように、3気筒のエンジン振動の主成分である 1.5 次振動をモータトルクによって相殺する事が可能である。

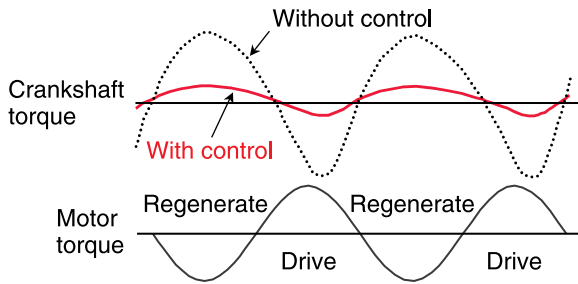


Fig.16 Principle of damping control

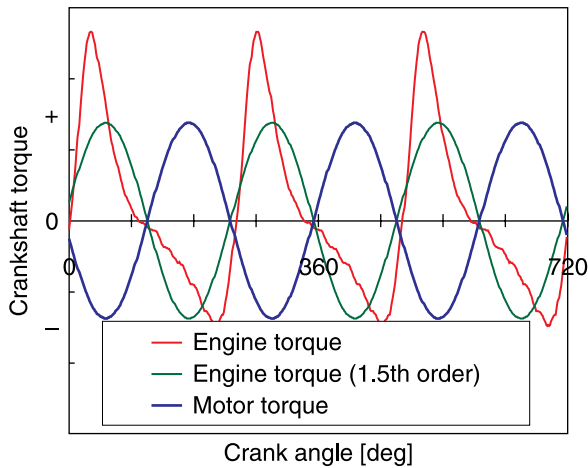


Fig.17 Example of engine and motor torque

制振制御では、エンジンの上死点信号を基準に、エンジン負荷と回転数をパラメータとしてトルクの位相を決定している。また印加するトルクの振幅についても同様にエンジン負荷と回転数をパラメータとして決定している。

印加するトルクの波形の生成にあたっては、上死点信号から得られたクランク角情報が必要である。

制振制御に用いるトルクとバッテリー充電のための回生トルクは二つを重畳して出力している。この関係を Fig.18 に、制振制御を行なった場合の効果を Table 4 に示す。

Table 4 Effect of damping control

Measuring point	Effect of damping control
Vibration of steering wheel	-3dB
Vibration of seat	-5dB
Sound pressure of vehicle compartment	-5dB

6. バッテリー寿命の確保

実使用環境においてバッテリー寿命を確保するためにはバッテリー SOC、電圧、温度を規定の範囲で使用する必要がある。

IMA システムでは電流センサ、バッテリー電圧センサとバッテリーボックス内温度センサを用い下記制御を行なっている。

- (1)適性な SOC 領域で使用する。
- (2)バッテリー電圧の上下限で入出力電力を制限する
(電圧パワーセーブ)。
- (3)バッテリー温度により入出力電力を制限する
(温度パワーセーブ)。

6.1. 電圧パワーセーブ

バッテリー電圧がバッテリー電流とバッテリー温度で決まる上下限電圧閾値を越えた場合、IMA システムは現在のモータ出力指令値に対し、車両挙動が急激に変化しないように徐々に出力指令値を減少させる。バッテリー電圧が規定の範囲に戻れば、制限された出力を徐々にもとに戻す。Fig.19 に概念図を示す。

6.2. 温度パワーセーブ

過酷な温度環境下においても過昇温防止、SOC 算出精度低下防止のため、バッテリー温度によりバッテリー電力が規定上限電力以下になるようモータ出力制限制御(バッテリー温度パワーセーブ)を行なっている。出力制御は Fig.20 のように設定し、バッテリーの温度を適正な範囲に保つことができた。

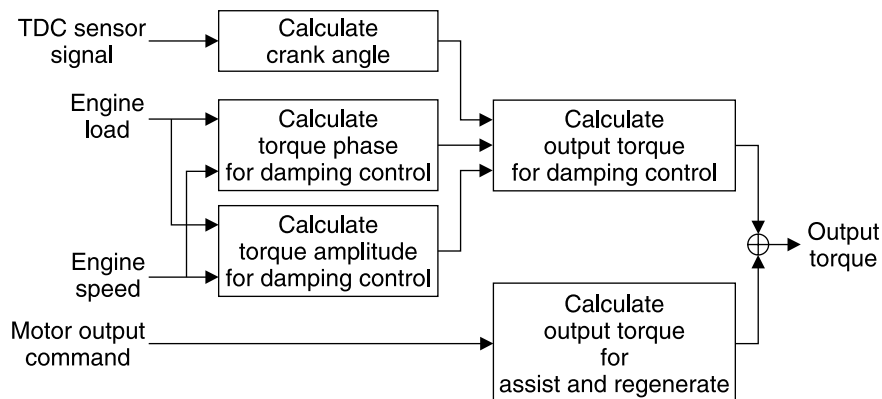


Fig.18 Block diagram of damping control

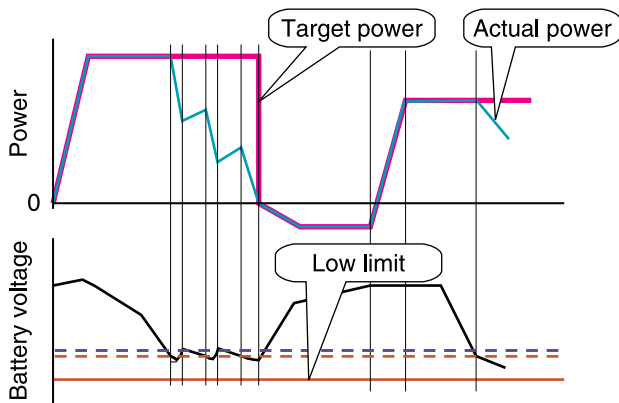


Fig.19 Power save control by battery voltage

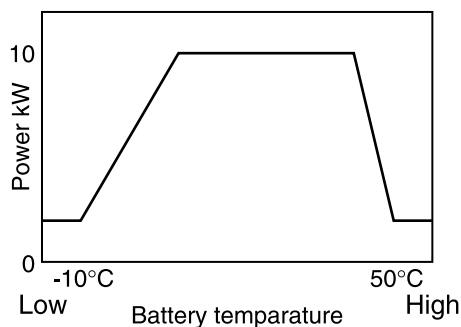


Fig.20 Power save action by battery temperature

参考文献

- (1) 岩井信夫：ハイブリッド自動車の燃料向上要因と将来展望，自動車技術，Vol.51, p.11-18 (1997)
- (2) 阿部眞一，佐々木正一，松井英昭，久保馨：乗用車用量産型ハイブリッドシステムの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.975, p.25-28 (1997)
- (3) 青木薫，梶原滋正，佐藤浩光，山本善夫：モータ式ハイブリッドパワートレインの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，98-99, p.9-12 (1999)

7. まとめ

モータの機能を加速時のアシストと減速時の回生制動に特化させたハイブリッドシステムにおいて，以下の成果を得る事ができた。

- ・ 走行状態やバッテリー SOC に対応したエネルギーマネジメントにより燃費向上に寄与した。
- ・ 高圧安全を考慮し車載性に優れたコンパクトなパッケージングを実現した。
- ・ エンジンとモータの駆動力を協調させるアシスト／回生システムを可能とした。
- ・ モータによるアイドリング振動の抑制制御により－3dB ～－5dB の振動低減効果が得られた。
- ・ モータアシストシステムによりアイドリング停止後のスムーズな再始動を実現した。

本システムを開発するにあたり多大なご協力をいただきました社内外の関係者の方に深く感謝の意を表します。

■ 著 者 ■



落合 志 信



内 堀 憲 治



原 一 広



鶴 見 隆 史



鈴 木 実