

論文・解説

26

水素 RE を用いたレンジエクステンダ EV の発電制御法 A Generation Control for Range Extender EV with Hydrogen RE

大室 朗*1

Akira Ohmuro

胡本 博史*4

Hirofumi Ebisumoto

堂園 一保*2

Kazuho Douzono

藤川 裕志*3

Yasushi Fujikawa

要約

2009 年に開発した「プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド」のバッテリー容量を拡大しプラグインによる充電機能を付加したレンジエクステンダ EV (Electric Vehicle) 「プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダ EV」を開発した。このハイブリッドシステムでは、バッテリーの大容量化によりエンジン発電量制御の自由度が上がることを活かし、電力収支バランス、熱効率、走行フィーリングなどのさまざまな要求を同時に満足する発電制御法を構築した。また追加された充電機能は、電気エネルギーにより走行できる航続距離を大幅に延伸した。本稿では、複雑に関わり合う要求仕様を同時に満足する発電制御および関連する技術について報告する。

Summary

Mazda Premacy Hydrogen RE Range Extender EV is developed from the Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid (2009). The Range Extender EV is equipped with a plug-in function and larger capacity battery. The new hybrid system with larger capacity and high voltage battery met concurrently various specifications required such as thermal efficiency, energy balance and engine sound when the vehicle is in motion. Also the plug-in function achieved an improvement of driving range with electric energy. In this paper, the detail of the electric generation control that satisfies the required specifications is described.

1. はじめに

2009 年に開発した「プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッド」⁽¹⁾⁽²⁾をベースに、エンジンを水素専用として熱効率を改善するとともに、バッテリー容量を拡大し充電機能を付加したレンジエクステンダ EV 「プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダ EV」を開発した。レンジエクステンダ EV とは、バッテリー充電率（以下 SOC : State Of Charge）が所定の値より高い時は EV 走行し、所定の値より低い時は SOC を下げないようにエンジンで発電しながら走行する車両のことをいう。この車両の利点は、エンジンを発電のみ用いるシリーズ型 HEV (Hybrid Electric Vehicle) と同じシステムであることからエンジンを高効率で作動できるだけでなく、プラグインによる充電を行うことで総合的な効率向上を図ることのできる点

にある。本車両では、この利点を活かし耐環境性や信頼性を確保しながら、電力収支バランス、熱効率、走行フィーリングを同時に満足する発電制御法を構築した。

本稿では、この発電制御法について次の順で詳細を述べる。まず 2 章においてレンジエクステンダ EV の要求仕様を解説し、3 章にて車両の構造を述べる。次に 4 章で、最適制御理論を用いたモデル予測制御法を導入した発電制御法を提案し⁽³⁾、この制御法が、電力収支バランス、熱効率、エンジン音による走行フィーリングの 3 つの要求を同時に満足することを示す。そして 5 章にて、この発電制御法に排気エミッション浄化制御やバッテリー保護制御を追加する。最後に 6 章で、常温や冷間の環境下でモード走行を行い、この発電制御法が自動車排出ガス規制やバッテリー保護を確保しな

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

がら、電力収支バランス、熱効率、走行フィーリングを同時に満足する手法であること示す。

2. レンジエクステンダ EV への要求仕様

本車両は、電力収支をバランスさせる CS モード (Charge Sustaining mode) において、耐環境性、信頼性、熱効率、走行フィーリングの観点から以下のような要求がある。

- (1) 電力収支バランス
 - ① バッテリ充電率 (SOC) を走行に影響しない水準に維持する。
- (2) 耐環境性と信頼性
 - ② 排出ガス中の汚染物質 (NOx・HC 他) を基準値以下に抑える。
 - ③ 車外騒音を基準値以下に抑える。
 - ④ バッテリの実充放電電力を充放電可能領域 (以下 SOF) 内に収める。
- (3) 熱効率
 - ⑤ 熱効率の高い動作点 (トルク・回転数) でエンジン発電を行う。
 - ⑥ エンジン始動停止回数をできるだけ少なくする。
- (4) 走行フィーリング
 - ⑦ エンジン音による走行フィーリングがドライバに違和感を与えないようにエンジン回転数及び回転数変化を制御する。
 - ⑧ 外部環境が高温時や冷間時において、常温時と変わらない走行を可能にする。

3. 車両の構造

3.1 車両の構造

開発した車両の外観を Fig. 1 に示す。本車両は内燃機関自動車をベースにレンジエクステンダ EV に改造したものである。搭載しているエンジンは排気量 654cc×2 の水素ロータリエンジン (RE) で、その他には駆動用モータ、ジェネレータ、高電圧バッテリーなどを搭載している。また、車両の主要諸元値は Table 1 となる。

Table 1 Vehicle Specification

model	Parameter	Value
Vehicle	Weight	1920kg
	Dimensions	4.6×1.7×1.6mm
Motor	MaxPower / MaxTorque	110kW / 350Nm
Generator	MaxPower	80kW
Fuel Tank	Capacity	150L / 35MPa
Battery	Type	Li-ion
	Nominal Energy	20kWh



Fig. 1 Appearance of Vehicle

3.2 シリーズ型 HEV 方式

本車両ではシリーズ型 HEV と同様の発電方式を採用している。その特徴は SOC が高い時は EV 走行し SOC が下がってきた時に発電しながら走行できるところにある。その方式の概要を Fig. 2 に示す。インバータはモータ、ジェネレータ、高電圧バッテリーと接続されており、モータ出力とジェネレータ出力との差分電力が昇圧されバッテリーに充電される。

また、補器類は直流・直流変換器 (DC-DC コンバータ) により降圧された電力を使用する。エンジンは PCM (Powertrain Control Module), モータはインバータ内の TMCM (Traction Motor Control Module), ジェネレータはインバータ内の GCM (Generator Control Module), 高電圧バッテリーは TBCM (Traction Battery Control Module) でそれぞれ制御し、VCM (Vehicle Control Module) により車両全体を制御する。

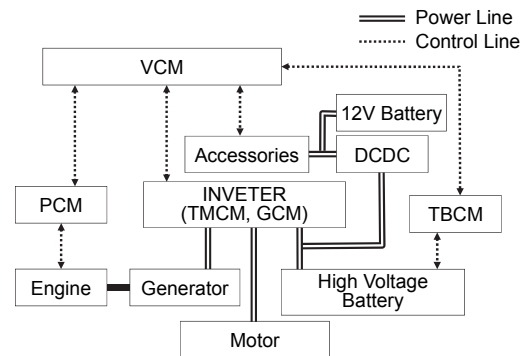


Fig. 2 Structure of Series HEV System

4. 基盤となる発電制御法

4.1 発電制御法の概要

本車両では、CS モードにおいて、1 サンプル時間ごとに評価関数を最小化しながらエンジン発電量を制御するモデル予測制御 (以下 MPC) を採用する。MPC は未来の状態変化を予測して操作量を決める機能を有するため、エンジン回転数を滑らかに変化させながら電力収支をバランスさせることが可能になる。

まず、車速 v_0 [km/h], 車両加速度 a_v [km/h/s], モータトルク T_r [Nm], SOC [%], 補器類の消費

電力 [kW] が観測できるとする。次に、現在時刻を 0 として予測時間区間 T_e を設定し、時間 $t \in [0, T_e]$ において現在の運転状態を維持する (a_v で加速し続ける) と仮定した場合に T_e 秒間に発電すべき総発電量 P_f [kJ] を算出する。この P_f は、現在 SOC を目標 SOC との差分電力および、 T_e 秒間にモータと補器類が消費する電力とから求める。そして、車両の運転状態に応じてエンジン音による走行フィーリングを良好に保つエンジン回転数 [rpm] を算出する関数としてフィーリング関数 $w(t)$ を定義し、 P_f と $w(t)$ とを含んだ評価関数 I を導入する。 T_e 秒間において評価関数 I を最小化するエンジン動作軌道を求め、その動作軌道の 1 サンプル時間後の値を目標動作点として PCM および GCM に出力し制御する。この制御法を 1 サンプル時間ごとに繰り返す³⁾ (Fig. 3)。

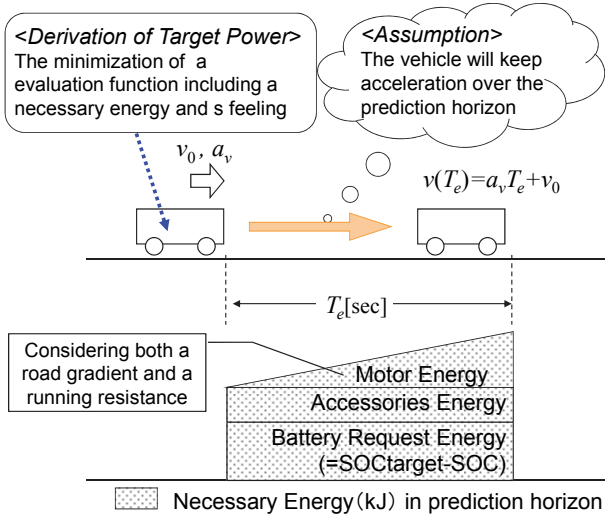


Fig. 3 Concept of Electric Generation Control

4.2 最適化問題の定式化

現在時刻 0 に対する時間を $t \in [0, T_e]$, エンジンの目標発電量 [kJ] を $x_1(t)$, エンジン目標回転数 [rpm] を $x_2(t)$, エンジン目標回転数変動 [rpm/sec] を意味する入力を $u(t)$ とする。この 3 変数に関して、目標発電量挙動を示す状態方程式と初期条件を次式(1)(2)のように表現する。この時、状態方程式内のパラメータ a_1, a_2 はエンジンの動作領域 (Fig.4 の点線) に基づいて設定するものとする。なお、 $\dot{\cdot}$ (ドット) は時間微分を表し、 N_0 は $t=0$ のエンジン回転数を表す。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_2 + a_2 \\ \dot{x}_2 = u \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ N_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

そして、重み係数を S_0, Q_0, R_0 とおき評価関数を式(3)のように設定する。第 1 項目が電力収支バランス, 第 2 項目が走行フィーリングに関する評価項になっており、重み係数の設定に応じて優先度を決められる³⁾。

$$I = \frac{S_0}{2} (x_1(T_e) - P_f(T_e))^2 + \int_0^{T_e} \left\{ \frac{Q_0}{2} (x_2(t) - w(t))^2 + \frac{R_0 u(t)^2}{2} \right\} dt \quad (3)$$

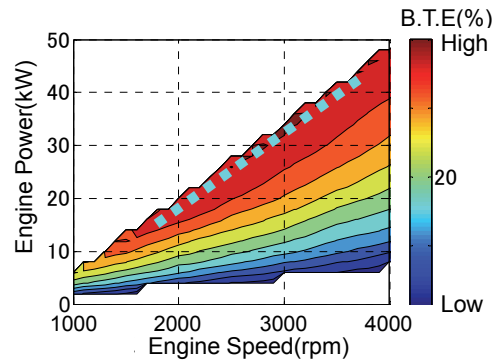


Fig. 4 Brake Thermal Efficiency (B.T.E) Map

ここでの $w(t)$ は 4.1 節で述べたフィーリング関数を意味し、次の条件 (式(4)) を満たすものと定義する。なお、 C^{n+1} は $n+1$ 回微分可能な関数の集合を示し、具体的には 4.5 節で設定する。

$$w(t) \in C^{n+1}, \quad \frac{d^{n+1} w(t)}{dt^{n+1}} = 0 \quad (4)$$

4.3 最適解の導出

最適レギュレータと呼ばれる最適制御問題に類似しているため、同様の手順で最適解を導出できる。まず、ラグランジュ乗数 $\psi(t)$ を導入して、ハミルトニアンやオイラー方程式を用いることにより最適解を導出する。 $\alpha = \sqrt{Q_0/R_0}$ とすると、エンジン目標回転数である x_2 に関して示すと式(5)となる (導出の詳細は文献(3)参照)。

$$x_2(t) = -\frac{\alpha \psi_2(0)}{\psi_0 Q_0} \sinh(\alpha t) + x_2(0) \cosh(\alpha t) - \alpha \int_0^t \sinh(\alpha(t-\tau)) w(\tau) d\tau + \frac{\psi_1 a_1}{\psi_0 Q_0} (\cosh(\alpha t) - 1) \quad (5)$$

4.4 モデル予測制御の実装

Fig. 5 に示すように本車両の発電制御システムは、VCM から PCM と GCM に制御指令を出力する構造になっている。まず VCM では、式(5)より 1 サンプル時間 Δt 秒後の $x_2(\Delta t)$ を算出し、その目標回転数において最も熱効率が高くなるトルクを目標トルクとしても求めておく。

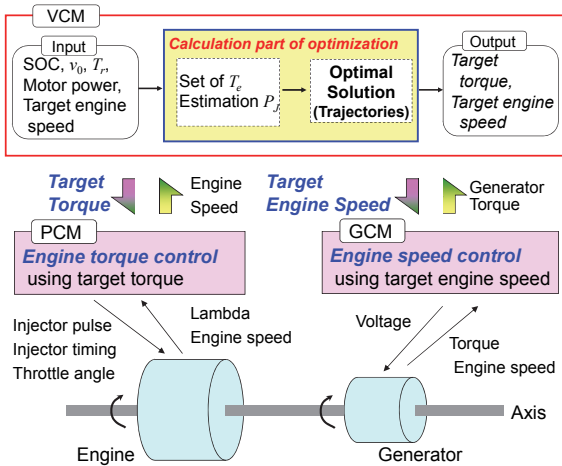


Fig. 5 Generation Control System

そしてVCMからPCMに向けては目標トルクやエンジン始動停止などの指令信号が送られ、PCMからVCMへはエンジン実回転数やエンジン水温などが送られる。この指令に基づいて、PCMはVCMからのトルク指令やエンジン実回転数に基づいてスロットル開度やインジェクタのパルス幅などを制御する。次に、VCMからGCMに向けては目標回転数やエンジン始動停止などの指令信号が送られ、GCMからVCMへはジェネレータ回転数やジェネレータトルクなどが送られる。GCMは目標回転数に従ってジェネレータの回転数を制御する。エンジンとジェネレータが直結されているので、このシステムにより発電電力制御が可能になる⁽³⁾。

4.5 フィーリング関数の設定

発電中のエンジン動作点を走行フィーリングの良い点に近づけるために式(4)を満たすフィーリング関数を導入している。予測時間区間 $[0, T_e]$ 中の車速を $v(t)$ として、本発電制御法には式(6)のように与える。

$$w(v(t)) = k_v(a_v)v(t) + w_0, \because v(t) = a_v t + v_0 \quad (6)$$

ここでは、走行中のエンジン音が車速変化に対してドライバに自然な印象を与えるために、エンジン回転数と車速とが直線的な関係になるよう $w(v)$ を設定する (Fig. 6)。

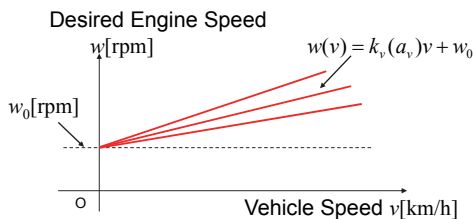


Fig. 6 Feeling Function

また、車速に対する $w(v)$ の変化率を表す k_v を加速度 a_v に依存させることで運転中の走行フィーリングをより向

上させることができる。なお、 k_v を一定とした場合の走行実験結果は、文献 (3) にて報告している。

5. 発電制御法に追加する機能

本章では、2章の要求仕様において、特に重要となる耐環境性と信頼性の①③並びに熱効率の②に関して追加する機能を述べる。

5.1 排気エミッション浄化機能

排気エミッションを浄化するために、本車両では、NOx 吸蔵還元触媒を車載リッチ燃焼により NOx を還元 (リッチパージ) する方法を採用した。シリーズ型 HEV の構造から無負荷によるリッチ燃焼が可能になることで、高効率発電とリッチ燃焼時の騒音抑制とを両立しながら SU-LEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) の基準を満足できる (背景は、「[プレマシー ハイドロジェン RE レンジエクステンダーEV の開発](#)」を参照)。そこで、触媒内の NOx 吸蔵量 [kg] を推定し、その推定値が所定値に達した際にリッチパージを実行する機能を追加した。その実行判定の考え方を以下に示す。

まず、1 サンプル時間中に触媒とエンジン間の排気ガスに含まれる NOx 量 A [kg/sec] をエンジン出力に応じて実験的に求めておく。そして 1 サンプル時間中に触媒に吸着する NOx 量 y [kg/sec] を式(7)のような近似関数を用いて算出する。

$$y = A \left(1 - \frac{x}{B} \right)^p \quad (7)$$

ここでの x は現在時刻の NOx 吸蔵量推定値 [kg] , B は触媒の NOx 最大吸蔵量 [kg] , p はエンジン出力に応じて変化する近似次数を表している。そして、その y を積算することで x が推定でき、その推定値が所定の値に到達したらリッチパージを実行する (Fig. 7)。

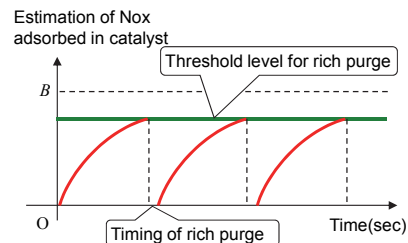


Fig. 7 Rich Purge

リッチパージの実行時間と実行判定のための所定値を実験的に求めた結果、JC08 モード中ではリッチパージが 2 回実行される制御仕様となった。

5.2 常温時におけるエンジン始動頻度の抑制機能

CS モードで走行している際のエンジン始動頻度に関する要求は次のようにまとめることができる。

- ① 走行中のエンジン動作の総時間をできるだけ小さくしたい。
- ② エンジンの始動停止回数をできるだけ減らしたい。
- ③ エンジン音による走行フィーリングを犠牲にしないようエンジンを動作させたい。
- ④ ロードノイズに対してエンジン音が目立ちやすい速度域ではエンジンを停止したい。

このような要求に対して、走行実験を行い、Table 2 のようなエンジン始動停止条件を求めた。この時、目標発電量（トルク・回転数）の導出には、アクセルオン時はモデル予測制御法を、アクセルオフ時は車速に比例して発電電力を決定する制御法を用いることとした（Fig. 8）。アクセルオフ時はエンジンを停止しても良いが、②③の要求からエンジンを止めない条件を設定した⁶⁾。この始動停止機能により、エンジン音による走行フィーリングを確保しながら、不必要にエンジンを停止させる頻度を小さくすることができる。

Table 2 Engine Start-Stop Condition

	Condition
Engine start	Vehicle speed ≥ 45 [km/h]
Engine stop	Brake on period \geq a few seconds or Vehicle speed ≤ 35 [km/h]

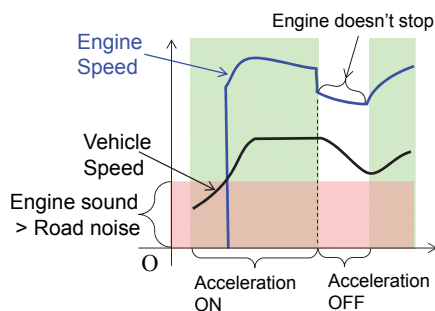


Fig. 8 Trajectory of Engine Output

5.3 高電圧バッテリーの保護機能

高電圧バッテリーはSOCやバッテリー温度に応じて充放電可能電力[kW]が変動する。例えば、高SOC時は充電可能電力（以下Pin）が小さくなり、温度が高い場合や低い場合ではPinと放電可能電力（以下Pout）の両方が低下する。特に、PinとPoutの両方が小さい場合では、加速中においてPoutでは不足する電力をエンジン発電電力で補いながらモータを駆動させる必要があるだけでなく、アクセルオフ時にはモータを空転させながらエンジンを停止させる必要もある。このような機能を追加しないまま通常走行をしてしまうと、PinとPoutの範囲を超えた電力がバッテリーに充放電されてしまう現象が発生する。このような現象が繰り返されるとバッテリーは大きく劣化してしまう。特にPinを超えた電力が充電される現象については制御が複雑となるため、その原因と対策について以下に述べる。

(1) 原因

- ① オーバシュート：エンジン出力上昇時に発電電力が目標発電電力を一時的に超えてしまう（Fig. 9の左図）。
- ② オフセット：低外気温中の定常発電状態において、発電電力が定常的に目標発電電力よりも大きくなる（Fig. 9の左図）。
- ③ 発電電力残り：モータ出力減少時にエンジン出力降下が遅れてしまう。

(2) 対策と効果

- ① オーバシュート：発電上限電力（Pin+モータ出力）と発電電力との偏差をPD制御法を用いてフィードバックすることにより、応答遅れを持つ発電電力挙動が発電上限電力を超えないように制御できる。（Fig. 9の右図）
- ② オフセット：バッテリーPinが小さい状態において、発電上限電力と目標発電電力との間に余裕を設けることにより、オフセットが発生したとしても、発電電力が発電上限電力を超えないように制御できる。（Fig. 9の右図）
- ③ 発電残り：モータ出力が減少し始めたら速やかに発電電力を0（エンジン停止またはアイドリング）にすることにより、モータ出力が0になる前に発電電力を0にできるため、発電電力が発電上限電力を超えないように制御できる。

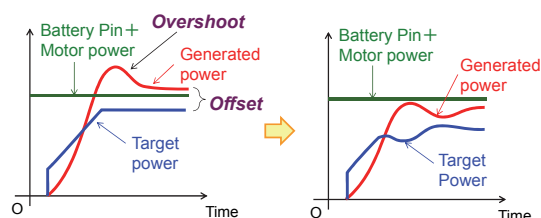


Fig. 9 Battery Protection Feature

6. 走行テストの結果

本章では、4章で提案した発電制御法に5章で示した機能を追加した制御法を組み込み、走行実験を行ったので、その結果を述べる。

6.1 常温でのモード走行

5章にて述べた機能を含んだ発電制御法を組み込んだ本車両においてJC08モード走行をCSモードで行ったところFig. 10のような結果となった。SOC挙動から、電力収支が目標SOC付近でバランスしていることが分かる。この時、リッチパーズを所定回数実行しながらバランスできていることが確認できる。またエンジン回転数の挙動から、フィーリング関数値付近でエンジンが回転していることが分かる。エンジン始動停止の挙動と併せてみると、ロードノイズよりもエンジン音が大きくなりやすい車速域（40km/h以下）においてエンジンが停止してい

ることが確認できる。さらに発電中のエンジン動作点をプロットしてみたところ Fig. 11 のようになった。この結果から、式(1)の a_1 , a_2 を Fig. 4 の点線になるように設定したことが効果的に作用しているといえる。

これらの結果をまとめると、SU-LEV を満足しながら、電力収支バランス、熱効率、走行フィーリングを同時に満たしていることが示された。

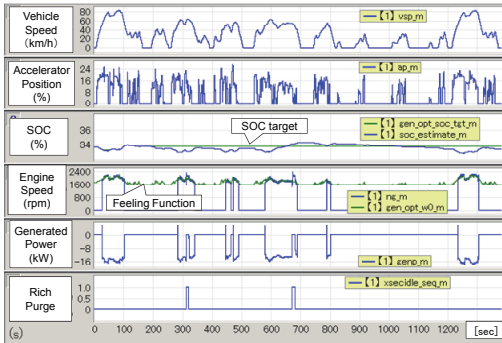


Fig. 10 Result of Driving Test of JC08 Mode

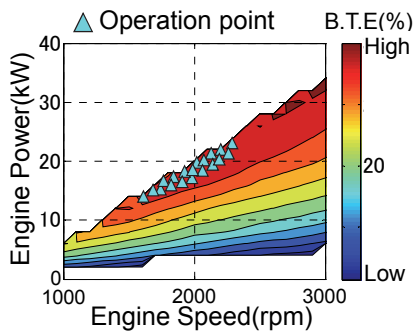


Fig. 11 Distribution of B.T.E During JC08 Mode

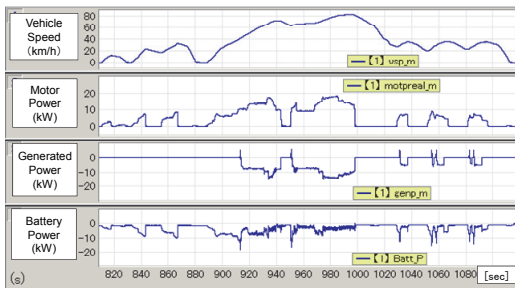


Fig. 12 Result of Cold Driving Test

6.2 高電圧バッテリーの保護を要する場面の走行

バッテリーの Pin と Pout が低下する場面の代表として、冷間環境において JC08 モード相当の走行実験を行った。この実験に際し、バッテリーの充放電可能電力が十分小さくなるまで (-10℃環境下で 24 時間程度) 事前に車両を冷却した。その状態から、JC08 モード走行を行った結果 (一部) を Fig. 12 に示す。まずバッテリーへの充放電電力 (充電側がプラス) の挙動から、放電のみで走行していることが分かる。これは、バッテリーの Pin を守りながら走行できていることを示している。また、このエンジン発電量の挙動を詳しく見た

ところ、発電電力上昇時にオーバシュートが抑えられていることと、モータ出力低下時に速やかに発電電力が 0 になっていることが確認できた。このように、追加した機能が有効に働きながら JC08 モードを走行できていることが示された。

また冷間でのモード走行では、バッテリーの温度上昇が Pin の回復をもたらすため、一時的に低下してしまった SOC が再び回復することが確認された。

7. おわりに

本稿では、レンジエクステンダ EV の発電制御において、耐環境性や信頼性を確保しつつ、電力収支バランス、熱効率、走行フィーリングの 3 つの要求を同時に満足する発電制御法を提案した。この制御法では、熱効率を考慮した発電量モデル (4.2 節) に対して電力収支と走行フィーリングとを考慮した評価関数を逐次最小化しながら目標発電電力を決定するモデル予測制御法をベースとして採用した。そして、その制御法に、排気エミッション浄化システム、エンジン始動停止条件、バッテリー保護機能などを組み合わせることにより、高度な要求 (2 章) を同時に満足する発電制御技術を実現した。

参考文献

- (1) 柏木ほか: プレマシー ハイドロジェン RE ハイブリッドの紹介, マツダ技報, No.27, pp.26-30 (2009)
- (2) 若山ほか: ハイドロジェン RE ハイブリッドシステムの開発, マツダ技報, No.27, pp.31-35 (2009)
- (3) 大室ほか: 電動車両の走行フィーリングを考慮した発電制御法, 自動車技術会春季大会前刷集, No.7-13, pp.13-18 (2013)

■ 著 者 ■



大室 朗



堂園 一保



藤川 裕志



胡本 博史