

キハ E200 形ディーゼル気動車のハイブリッドシステム

白木 直樹* 加藤 洋子 安井 義隆 (東日本旅客鉄道株式会社)

金子 貴志 大石 亨一 (株式会社日立製作所)

A Hybrid System for Diesel Railcar Series Ki-Ha E200

Naoki Shiraki*, Youko Katou, Yoshitaka Yasui (East Japan Railway Company)

Takashi Kaneko, Ryoichi Oishi (Hitachi Ltd.)

East Japan Railway Company (JR East) developed the hybrid system with the diesel engine and the lithium-ion battery, and began operational service of the world's first hybrid diesel railcar Ki-Ha E200 in 2007. This hybrid system could decrease the negative environmental impact of the diesel railcar.

The deterioration investigation of the storage battery was executed in 2009 and it is suggested the longevity might be extended for several years from this investigation.

キーワード: ハイブリッドシステム、ディーゼル気動車、リチウムイオンバッテリー、コンバータ、エネルギー管理制御 (Hybrid system, Diesel railcar, Lithium-ion battery, Converter, Energy management control)

1. 緒言

JR 東日本エリアの地方閑散線区では非電化区間が多く (JR 東日本の 27%、2030km)、ディーゼルエンジンを動力源とした気動車が多く運用されている。近年の環境問題の高まりを受け、当社でも省エネ車両の投入など、環境対策を積極的に行っている。気動車の環境負荷低減を目的として、ディーゼルエンジンと蓄電池によるハイブリッドシステムの開発を行い、2007 年 7 月から営業運用としては世界初となるキハ E200 形ハイブリッド気動車を投入した。

キハ E200 形気動車はハイブリッドシステムにより回生エネルギーの有効利用を図るとともに、排気ガス中の有害物質を低減したエンジンを採用し、環境負荷の低減を図った。また小海線での運用にあたり、ハイブリッドシステムのエネルギー管理制御を営業線区に合わせ改善を図った。

本論文ではキハ E200 形ハイブリッド気動車のシステム概要とその効果をまとめ、さらに 2009 年に行った蓄電池の劣化調査結果について紹介する。

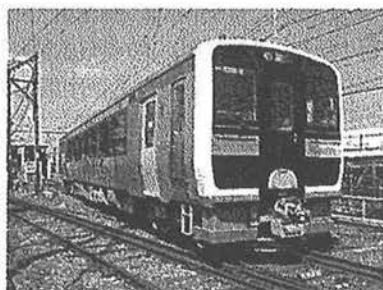


図1 キハ E200 形ハイブリッド気動車

2. キハ E200 形ハイブリッドシステム概要

〈2・1〉 ハイブリッドシステム概要 図2にハイブリッドシステム構成図を示す。本システムはディーゼルエンジン、発電機、主回路蓄電池、主変換装置 (コンバータ・インバータ+補助電源装置) 及び誘導電動機から構成される。エンジンの機械的動力を一旦電氣的エネルギーに変換し、それと蓄電池の電氣的エネルギーを合わせ、VVVF インバータで主電動機を駆動する「シリーズハイブリッドシステム」である。主回路蓄電池は中間リンク部に位置し、コンバータの出力とインバータが必要な電力のバランスにより主回路蓄電池の充放電電力を制御する。

力行時はエンジンからの電力と蓄電池からの電力を用いて、主電動機をインバータで駆動する。低速域ではエンジンを停止しバッテリーの電力のみで加速するため、電車と同様、非常に静かな加速となる。[1],[2]ブレーキ時には回生電力を蓄電池に蓄え、次の加速や補助電源 (サービス電源) の電力として有効利用する。またエンジンの停止・起動は車両の走行状態や蓄電池の充電状態等により主変換装置の制御部から自動で行われる。

さらに駅停車時は補助電源装置には蓄電池から電力が供給され、基本的にエンジンは動作しない。このため駅停車時の騒音を大幅に低減することができた。

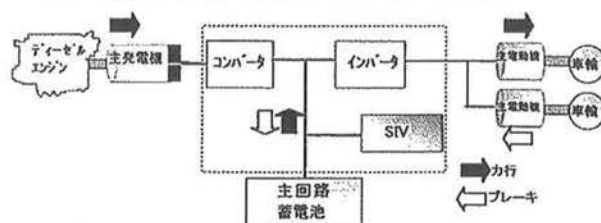


図2 キハ E200 ハイブリッドシステム

〈2・2〉 ハイブリッドシステム仕様 キハ E200 形気動車のハイブリッドシステム仕様を表 1 に示す。

表 1 主回路システム仕様

項目	仕様
主回路電圧	DC680V
最高速度	100km/h
起動加速度	0.639m/s ² (2.3km/h/s)
主回路システム	3 相 2 レベル主変換装置 3 相 2 レベル補助電源装置
エンジン出力	331kW / 2100rpm
主電動機	3 相誘導電動機, 95kW
発電機	3 相誘導発電機, 270kW
補助電源装置	3 相 AC 440V 50kVA
主回路蓄電池	リチウムイオンバッテリー 15.2kWh

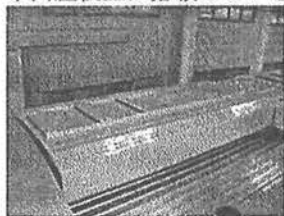
3. ハイブリッドシステム機器

〈3・1〉 主変換装置 主変換装置は主電動機 2 台を制御するインバータ、エンジン/発電機の発電電力を制御するコンバータ、空調や室内灯の電源である補助電源装置を一体化した構成である。各部はそれぞれ独立し制御される。

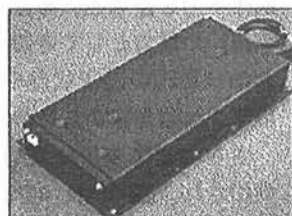


図 3 主変換装置

〈3・2〉 主回路蓄電池 主回路蓄電池は高出力、高密度なリチウムイオン 2 次電池とした。端子間電圧は性能面や安全面から DC680V とした。また蓄電池故障時の冗長性を考慮し、蓄電池回路を 2 群並列構成とし、片群故障時でも残りの片群で動作できる。主回路蓄電池は群ごとに箱に内蔵され、車両屋根上に搭載している。



主回路蓄電池箱



バッテリーモジュール

図 4 主回路蓄電池箱

主回路蓄電池はリチウム電池の蓄電池モジュール (図 4) を用いており、これを 4 個直列×2 列接続で 1 群を構成している。このモジュールは 48 個の蓄電池セルで構成されている。リチウムイオン電池は各セルをバランスよく蓄電する必

要があるため、4 個ごとのセル電圧セルコントローラが、蓄電池群をバッテリーコントローラが制御している。このため主変換装置、バッテリーコントローラ、セルコントローラ間で制御伝送を行い、蓄電池の充放電制御を行っている。

表 2 主回路蓄電池仕様

項目	セル	モジュール
種類	マンガン系リチウムイオン蓄電池	
定格電圧	3.6V	173V
容量	5.5Ah	5.5Ah
寸法	Φ40×L108mm	L611×W318×H103mm
重量	0.3kg	23kg

〈3・3〉 エンジン/発電機 発電装置はディーゼルエンジンと誘導発電機の組み合わせで構成している。最大発電電力は 300kW とし、主回路蓄電池故障時、エンジン出力のみで走行性能を確保できる仕様とした。エンジンはコモンレール方式を採用し、Nox 等を大幅に低減している。

〈3・4〉 主電動機 主電動機は三相誘導電動機を採用している。主回路電圧が DC680V である (日本では DC1500V が一般的) ため、本気動車用主電動機の新設計を行った。

4. ハイブリッドシステム制御

〈4・1〉 概要 主変換装置の制御部は、コンバータ部、インバータ部、補助電源部の各制御と共に、エンジンやバッテリー等の各機器の状態を統括的に把握し、ハイブリッドシステム全体を制御する機能を有している。

〈4・2〉 エネルギー管理制御 ハイブリッドシステムではエンジン・発電機、主変換装置、主電動機の制御、蓄電池充放電など、個々の動作を最適に動作させることが重要となる。そこで本システムでは、「エネルギー管理制御」という制御方式を用いている。これは走行速度で変化するエネルギー (蓄電エネルギー、運動エネルギー) の和を一定に保つように発電電力を制御するシステムである。本制御は走行速度と蓄電池蓄電量 (SOC) に応じて制御モードを分類し、モードにより発電出力を制御しエネルギー調整を行う (図 5)。この制御により走行状態に応じて蓄電池出力とエンジン出力を制御し、必要な走行性能を確保する。

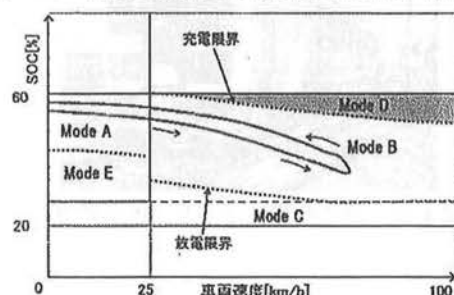
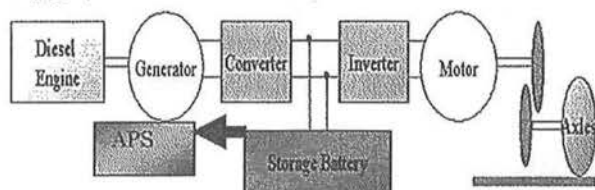


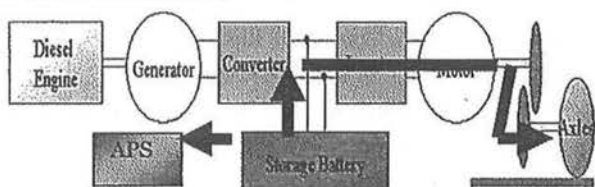
図 5 エネルギー管理制御モード

また図 6 に示すように、加減速状態や、走行速度、蓄電池の充電状態等により動作モードを変化させる。

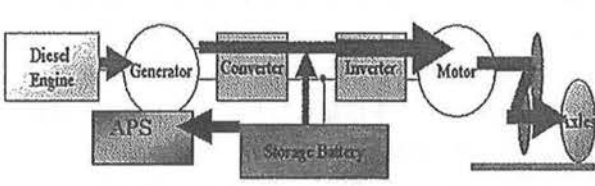
1. 駅停車



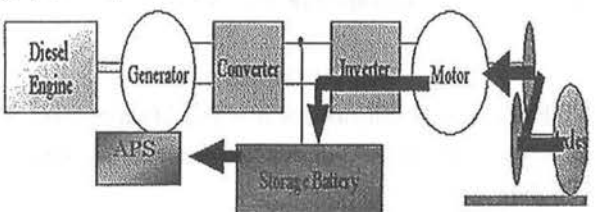
2. 力行(25km/h まで)



3. 力行(25km/h 以上)



4. ブレーキ



5. 抑速走行

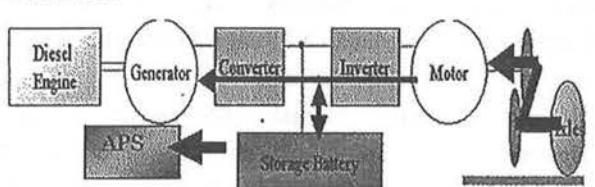


図 6 各モードのハイブリッドシステム動作

- (1) 駅停車：駅構内の騒音防止のため、エンジン発電を停止し、バッテリー電力のみでサービス機器を動作させる (Mode A)。SOC が低下した場合はエンジン発電を行い、充電する (Mode E)。
- (2) 力行(25km/h まで)：25km/h までは蓄電池のみで、力行する (Mode A)。
- (3) 力行 (25km/h 以上)：25km/h 以上ではエンジンと蓄電池で力行する (Mode B)。
- (4) ブレーキ：エンジン発電を停止して回生電力を蓄電池に蓄える (全てのモード)。
- (5) 抑速走行：エンジン発電を停止して回生電力を蓄電池

に蓄える (Mode B、C)。SOC が充電上限に達し過充電を防止する (Mode D)。

力行、ブレーキ中では、図 5 に示すように、SOC がモード A と B 内に収まるように制御する。

5. ハイブリッドシステム効果

〈5・1〉 環境面の効果 本ハイブリッドシステムの搭載による回生ブレーキのバッテリーへの充電効果やコモンレール方式のエンジンの採用により、キハ E200 形気動車では以下の効果が得られた。

- ・ 10% ハイブリッドシステムにより燃費低減 (小海線)
- ・ 60% コモンレールエンジンによるエンジン排気汚染物質低減
- ・ 30dB 駅停車時の騒音軽減

〈5・2〉 燃費改善 キハ E200 形気動車の更なる燃費改善のため、走行する小海線に合わせた制御改善を行った。小海線は勾配区間では標高差が 700m あり、野辺山を境に 20%を超える連続勾配区間が続く。このため下り勾配区間では回生ブレーキにより蓄電池 SOC が充電限界に達してしまうため、回生電力を十分に蓄電池に充電することができなかった。

回収できる回生電力の向上、及びエンジン発電時間を減らし燃料消費量を低減するため、以下の制御を設けた。[3]

○下り勾配区間ではだ行、力行時に行っているエンジン発電を停止させ、蓄電池のみの電力で走行する制御とした。

力行、だ行時にできるだけ蓄電池を放電させブレーキ時により多く充電する。これを「下り勾配モード」と名づけた。ただし蓄電池出力のみで力行するため、力行電力は蓄電池最大許容電力を超えない範囲としている。

○エンジン発電による出力補足を最も燃費のいい回転数 1670rpm で発電 (発電出力 270kW) する制御とした。

○放電限界を 40%から 30%に下げた。

これらにより、下り勾配区間に充電可能なバッテリー容量が増え、回生ブレーキ回収率が向上する。

図 7 に試験走行時の SOC 軌跡を示す。下り勾配モードの採用により、回生ブレーキが蓄電池に充電できている。

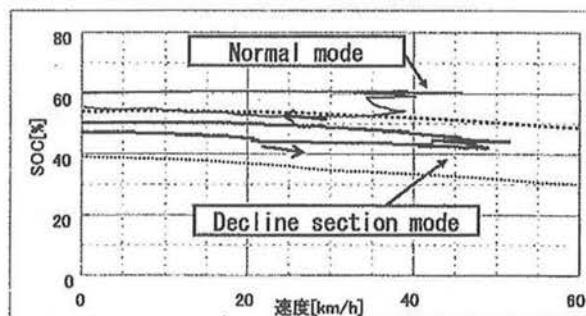


図 7 試験走行での SOC 軌跡

図 8 に標準モードと下り勾配モードでの燃費 (走行試験結果) を示す。下り勾配区間のみの燃費は 2 倍、全線区では 5%改善した。従来車との比較ではさらに 1%程度改善した。

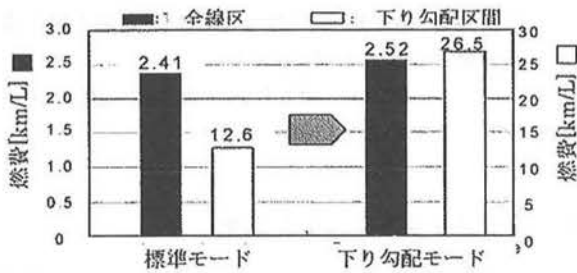


図 8 試験走行時の燃費

6. 主回路蓄電池劣化調査

キハ E200 が営業を開始してから 2 年経過した 2009 年 9 月 (走行距離約 140,000km) に主回路蓄電池の容量や電圧、内部抵抗など、劣化傾向を調査した。

〈6・1〉 主回路蓄電池外観調査 主回路蓄電池モジュールの外観検査を実施したところ、全体的にススが付着していた。主回路蓄電池箱は屋根上、エンジン排気口近くに搭載されており、エンジン排気内のススが蓄電池に付着していることが予想される。このため吸込フィルター変更とともに、エンジン排気口面積を小さくし、排気速度を上げる対策を実施した。

〈6・2〉 蓄電池セル電圧 図 9 に主回路蓄電池の各セル電圧アンバランス結果 (セル平均電圧と各セルの電圧値の差) を示す。電圧アンバランス量は 10mV から最大 38.3mV であり、大きなアンバランスは見られなかった。これにより蓄電池性能が確保できていることが分かった。

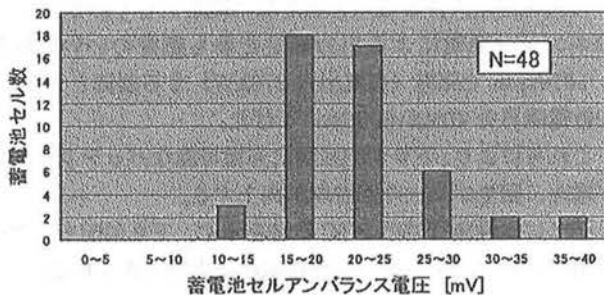


図 9 蓄電池セル電圧アンバランス測定

〈6・3〉 蓄電池内部抵抗 主回路蓄電池セルの内部抵抗測定結果を図 10 に示す。

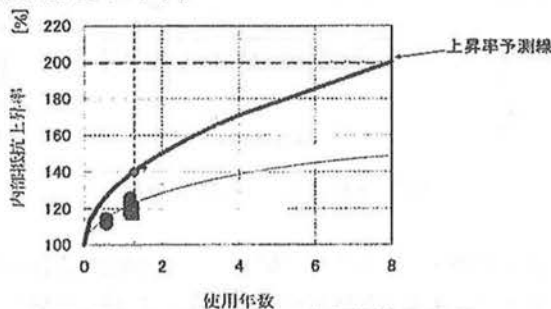


図 10 バッテリーセル内部抵抗上昇率

内部抵抗の上昇が見られるが、設計時に予想した 2 年経過後の内部抵抗上昇率よりも小さい上昇率となっている。設計時はバッテリー寿命を 8 年と予測したが、今回の結果から推定すると、数年延長することが可能であるといえるため、寿命については、今後も継続して劣化傾向の調査を行っていく。

7. 結言

当社では気動車の環境性能向上を目的に、営業車として世界初となるキハ E200 形ハイブリッド車両を 2007 年に投入し、燃費や NOx 低減を図ることが出来た。さらに小海線運用への制御改善により、燃費をさらに向上できた。これによりハイブリッド車両が他線区に投入される場合、最適な制御方式を採用することが出来るようになった。

環境問題は今後より重要になり、様々な新しいシステムが開発されている。[4],[5]当社では 2030 年までに CO2 排出量 50%削減 (1990 年度比) を目標に掲げており、目標達成のためにも、ハイブリッドシステムのさらなる改善を進め、ハイブリッド気動車を投入していく予定である (2010 年秋にはハイブリッドシステムを搭載したリゾートトレインが導入される)。また、環境負荷低減のためのシステム開発として、架線の下では電車として走行し、非電化区間では蓄電池の電力のみで走行する「蓄電池駆動電車システム」の開発を開始しており、今後も環境問題に積極的に取り組んでいく。

REFERENCES

- [1] T.Hata, and N. Shiraki, et al: "The Main System of Ki-Ha E200 of JR-East" Railway Cybernetics, November 2007, No502
- [2] Tetsuro Omura, Motomi Shimada, et al.: "Hybrid Traction System for Railway Vehicles", The 21st Worldwide Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS21)
- [3] Naoki Shiraki, Takeshi Shinomiya, et al.: "Improvement in main circuit redundancy of hybrid vehicle KIHA E200", The 2007 Tokyo Local Seminar I.E.E. Japan, B-11
- [4] Investigating R&D Committee on Energy Storage Application Technologies for Mobile Vehicles: "Current and Future Technical trends Energy Storage Application Technologies for Mobile Vehicles", Technical Report No.1161, I.E.E.Japan
- [5] Keiichiro Kondo: "Energy Storage Application Technologies on 20 Years Future in the Electric Railway System" The 2009 Japan Industry Applications Society Conference, I.E.E.Japan, JIASC 2009, 3-63, (2009.9) (in Japanese)