

特集：サステイナブル “Zoom-Zoom”

6

水素燃料電池ハイブリッドシステムの開発 Development of Hydrogen RE Hybrid System

若山 敬平^{*1} 米 盛 敬^{*2} 松島 智善^{*3}
Norihiro Wakayama Kei Yonemori Tomoyoshi Matsushima
瀬尾 宣英^{*4}
Nobuhide Seo

要 約

2006年に開発した「マツダRX-8水素燃料電池」に続き、水素燃料での航続距離と加速性能の大幅な改善を目指し、ハイブリッドシステムを搭載した「マツダプレマシー水素燃料電池ハイブリッド」を新たに開発した。ハイブリッドシステムには、近年のモータ・ジェネレータの効率改善を最大限に活用することを目指し、シリーズ方式を採用した。駆動用モータは巻線を走行中に切り替える技術を取り入れ、高回転型と高トルク型の出力特性を併せ持つ、小型高効率なモータを実現した。モータ、ジェネレータの設計においては、常用回転方向の効率を重視した非対称電磁界設計を行った。高電圧バッテリーは入出力特性に優れたリチウムイオンバッテリーを採用し、セル構造は搭載性と冷却性に優れたラミネートタイプとした。これら新技術を採用したハイブリッドシステムにより、水素での航続距離200km(10・15モード)と、優れた加速性能を実現した。

Summary

Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid has been developed, following RX-8 Hydrogen RE launched in 2006, aiming for dramatic improvements in hydrogen fuel range and acceleration performance with a hybrid system. A series hybrid system has been adopted to fully leverage the recent improvement in efficiency of motors and generators. The driving motor that electrically switches its windings during driving has been mounted. This switching technology allows the motor to be small and high-efficient, while having both high-speed motor and high-torque motor characteristics. Electro magnetical fields of the motor and generator are asymmetrically designed to improve the efficiency in the regular rotation direction. The lithium-ion high voltage battery, which has excellent input-output characteristics has been adopted. The laminated cell structure, which has excellent battery packageability and eases battery cooling has been employed. The hybrid system featuring these new technologies enhances the hydrogen fuel range to 200km(10・15 mode) and achieves excellent acceleration performance.

1. はじめに

「RX-8水素燃料電池⁽¹⁾⁽²⁾」に対し、水素での航続距離と加速性能、居住性等の大幅な改善を目指し、独自のシリーズハイブリッドシステムを搭載した「プレマシー水素燃料電池ハイブリッド」を開発した(Fig.1)。本稿では、このハイブリッドシステムの主な仕様と採用した新技術、車両性能への効果について述べる。



Fig.1 Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

2. ハイブリッドシステムの概要

2.1 主な仕様

Table 1にハイブリッドシステムの主な仕様を、Fig.2にシステムの構成を示す。水素ロータリエンジン（水素RE）は最大80kWを出力し、水素REと直結されたジェネレータがこの出力を電力に変換する。この電力と高電圧バッテリーからの電力を合わせることで、最大出力110kWのモータを駆動させる。

RX-8ハイドロジェンREのシステムを踏襲し、ガソリンでも走行可能とした。そのため、水素ステーションが整備されていない地域において水素切れになった場合でも、走行不能に陥ることはない。また、水素切れの場合は走行中でも自動でガソリンに切り替える。更に、利便性を考慮し、水素とガソリンの燃料切り替えを手動でも可能にしている。

Table 1 Specifications of Hydrogen RE Hybrid System

| | | |
|----------------------|------------------|---------------------------------------|
| Engine | Fuel | Hydrogen or Gasoline |
| | Max Power | 80kW |
| Generator | Type | Permanent Magnet AC Synchronous Motor |
| Motor | Type | Permanent Magnet AC Synchronous Motor |
| | Max Power | 110kW |
| | Max Torque | 350Nm |
| High Voltage Battery | Type | Li-ion |
| | Max Output Power | 40kW |
| Hydrogen Storage | | 35MPa High Pressure Gaseous Hydrogen |

2.2 シリーズハイブリッドの利点

一般的に、ハイブリッドシステムには、パラレル、シリーズパラレル、シリーズの3方式が存在する。本ハイブリッドシステムの選定にあたっては、半導体電力変換素子や高性能磁石応用モータといった電気駆動技術の向上を最大限に活用することを目指し、シリーズ方式を採用した⁽³⁾。

シリーズ方式では、他の方式と比較して、エンジンの動力を一旦電力に変換し、再び機械的な動力に変換する動力伝達が支配的となる。そのため、ギヤ等の機械的な動力伝達の効率よりも、ジェネレータ・モータでのエネルギー変換効率が燃費に大きく寄与する。ジェネレータ・モータの今後の効率改善にとともに、シリーズハイブリッドのシステム全体のエネルギー効率は、他のハイブリッド方式よりも、大きな改善が期待できる。

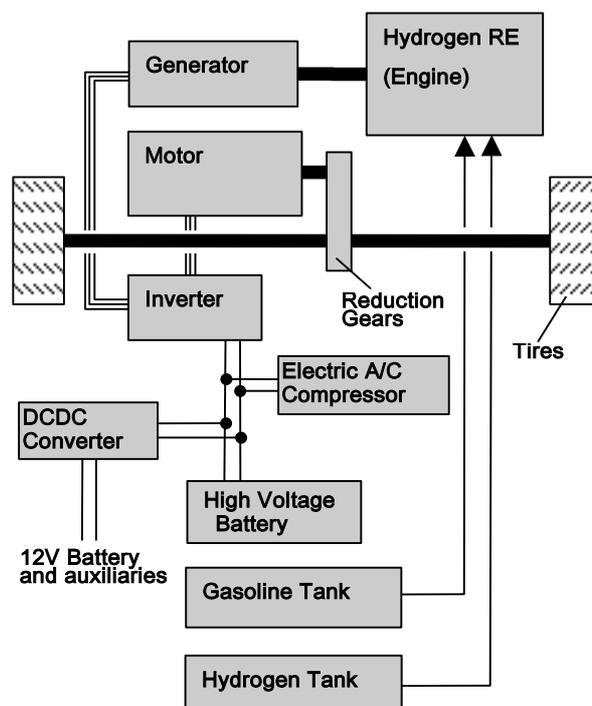


Fig.2 Schematic Diagram of Hydrogen RE Hybrid System

2.3 システムの動作

発進や定常走行などのモータ出力が比較的小さい走行シーンではエンジンは停止し、高電圧バッテリーからの電力で走行する。加速や高速走行等の比較的大きなモータ出力が要求されるシーンでは、エンジンを始動し、エンジンで発電する電力によってモータを駆動する。全開加速など一時的に大変大きな出力が必要なシーンでは、エンジンによる発電電力に高電圧バッテリーからの電力を加えモータを駆動する。減速時には駆動用モータが発電機として働き、減速エネルギーを回収し、高電圧バッテリーに蓄える。

また、エンジン出力とモータ出力をできるだけ同調させるため、例えば加速に合わせてエンジン回転数が上昇するなど、通常の内燃機関と同様の走行感覚を体感できる。

エンジンはハイブリッドシステムの要求に従い出力するが、水素運転とガソリン運転、各々で最適なエンジン回転数とエンジントルクを出力することで、高燃費と優れた排出ガス特性を実現している。

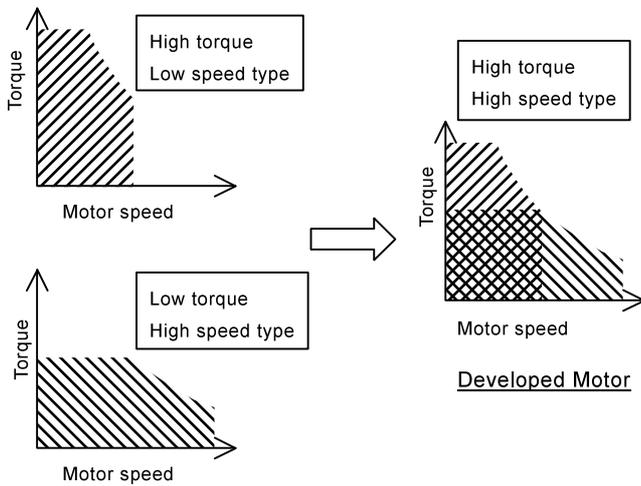
3. モータ・インバータ技術

通常、モータ設計においては高トルク型か、高回転型を選択し、ステータの巻線仕様を決定する必要がある。本システムでは、巻線切り替え装置により運転中にモータ巻線数を切り替えることによって、高トルク型と高回転型の双方の特性を両立する技術を開発した。低車速域では高トルク型モータにより加速性能を確保し、高車速域ではコイル

巻数を低減することで高回転型モータへ移行させて最高性能を満足させた。この技術により、通常は両立困難な高トルク・高回転特性を単一のモータにて実現している (Fig.3)⁴⁾。

Fig.4に本システムで採用した電子式巻線切り替えの概念を示す。モータの三相スター結線の各相巻線の巻数を走行シーンに応じて選択可能とした。低回転時は全巻線を利用し、効率よく高トルクを発生する。

一方で高回転時は電池電圧に対する誘起電圧の相対的上昇を抑制するために一部のコイルを電気的に切り離す。具体的には高速用と低速用の二つの中性点を備えており、これらのON/OFFを電子制御で瞬間的に行うことで、モータ走行中にトルクの連続性を保ちながらトルク特性を切り替えることを可能とした。



Conventional IPM Motor

Fig.3 Torque-speed Characteristic of the Traction Motor

従来の機械式巻線切り替えとの比較をFig.5に示す。電子式巻線切り替えでは、俊敏な動作によりトルク抜けを生ずることなく、連続的にトルクを発生しながら切り替えている。これにより運転者はトルクショックを意識することなく運転することが可能である。

また、モータ・ジェネレータともに基本的な動作が片方向回転であることに着目し、磁石配置を回転非対称に電磁界設計した埋込磁石同期モータとした (Fig.6)。なお、Fig.6においては、本来円弧形状である磁気回路の一部 (扇形) を直線状に展開し、模式的に示している。

通常は正転/逆転のいずれも同じトルク特性となるように配置するV字磁石の底部を、正転方向に対し後進配置することにより、最大トルクを逆転方向よりも増大させた。一般的なIPMモータに対し、マグネット・トルク・ピークとリラクタンス・トルク・ピークを機械的に接近させた結果、総合トルク・ピークが増大した (Fig.7)⁵⁾。

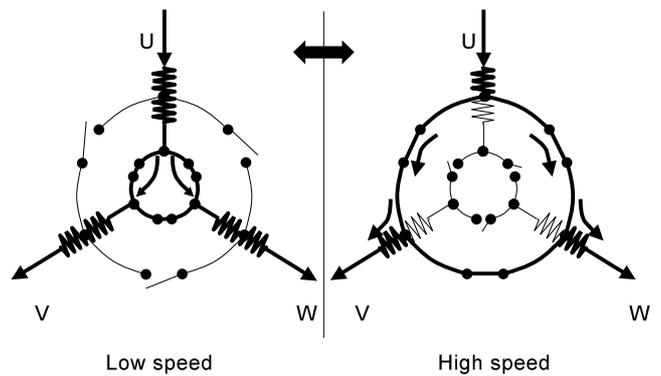


Fig.4 Conceptual Diagram of the Electric Winding Change

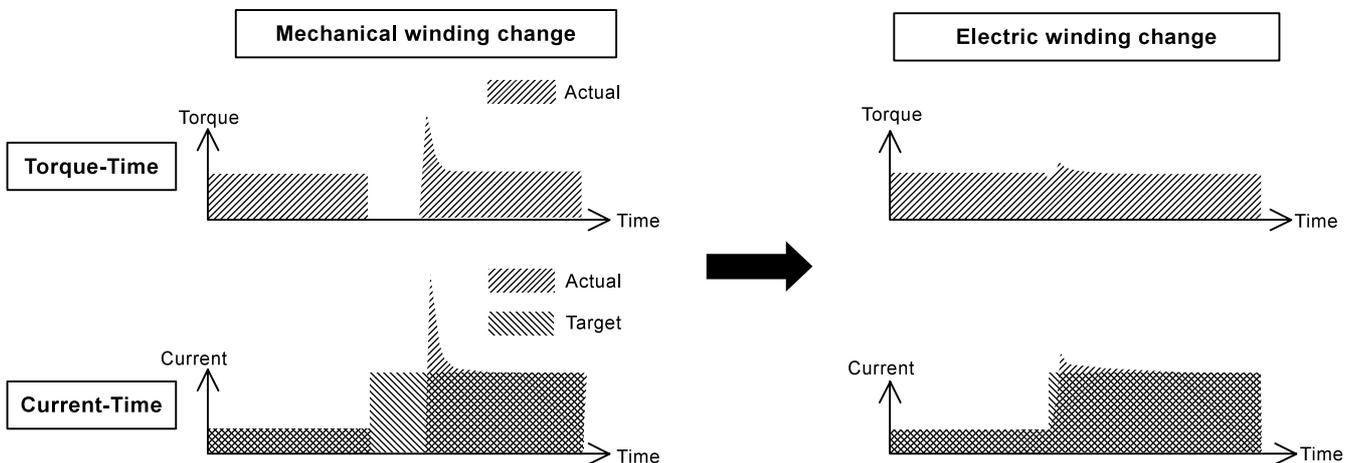


Fig.5 Comparison of Torque Continuity During the Winding Change

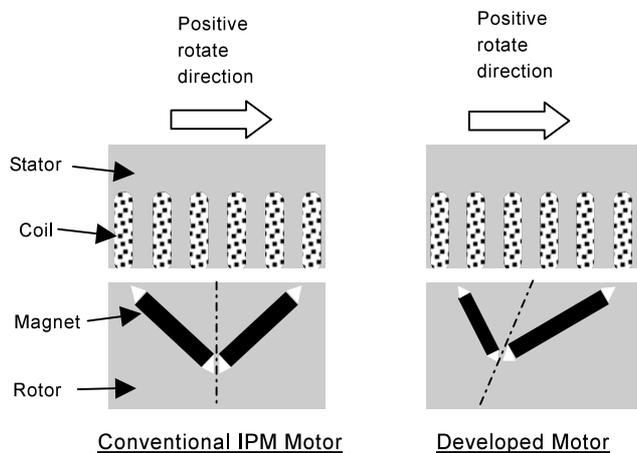


Fig.6 Comparison of the Magnetic Circuit Design Concept

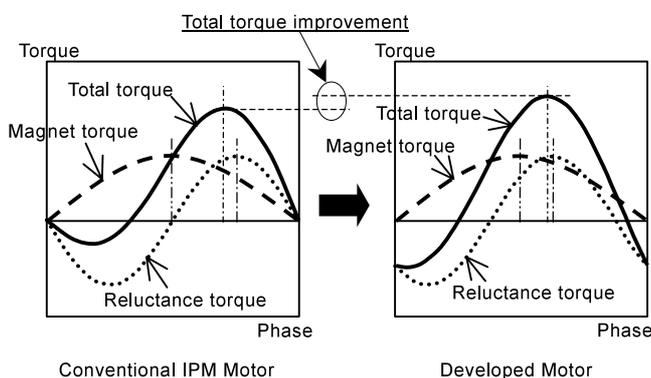


Fig.7 Total Torque Improvement Mechanism

これら2つの技術の組み合わせにより、高効率運転領域を広範囲に拡張し、動作効率の向上ができた。また、モータの最大トルクを向上させ、コンパクトに仕上げることができた。

なお、本モータとジェネレータ、インバータは(株)安川電機との共同開発によって製作した。

4. バッテリー技術

高電圧バッテリーは加速・定常走行時に駆動用モータへ電力を供給するとともに、減速時にはエネルギーを回収する役割があり、ハイブリッドシステムの中で重要な要素の一つである。Table 2に高電圧バッテリーの主要諸元を示す。Fig.8にバッテリーパックの外観を示す。

本ハイブリッドシステムでは、エネルギー密度が大きく出力特性に優れたリチウムイオンバッテリーを採用した。セル構造は搭載性および冷却性に優れたラミネートタイプを採用した (Fig.9)。

バッテリーパックはセル、ジャンクションボックス、バッテリーコントローラなどから構成される。

本システムにおいてバッテリーコントローラは、①バッテリー状態 (電流・電圧・充電状態など) のモニタリング、②入出力可能な最大電力の算出、③バッテリーセル間の充電バランス、④異常監視などの機能を有する。車両コントローラはバッテリーコントローラからの情報を受け取り、入出力を制御する。

高電圧バッテリーは空冷方式で冷却を行っており、セルの温度に応じて冷却ファンが作動し、冷却風量が適切にコントロールされる。

Table 2 Specifications of the High Voltage Battery

| | |
|-----------------|---------------|
| Battery type | Lithium - ion |
| Nominal Voltage | 346 V |
| Capacity | 3.65 Ah |
| Maximum output | 40 kW |
| Minimum input | 25 kW |



Fig.8 Appearance of the Battery Pack



Fig.9 Appearance of the Cells

5. ハイブリッドシステムの効果

RX-8ハイドロジェンREの水素での航続距離は100km (10・15モード)である⁽¹⁾。これに対し、ハイブリッドシステムの採用と高圧水素タンクの容量増大(110L 150L)により、車重増等の影響を補って、プレマシーハイドロジェンREハイブリッドの航続距離は200kmに伸ばすことができた。

ハイブリッドシステムの採用により、水素運転時の駆動軸での出力を、エンジン単独駆動と比べて約40%増大した。この結果、停車から100km/hまでの到達時間を4割短縮することが可能となった。

6. おわりに

新技術を取り入れたハイブリッドシステムにより優れた航続距離と加速性を持った水素自動車を開発することができた。加えて、エンジンとモータ出力を同調させることで、慣れ親しんだ内燃機関の走行感覚を具現化できた。実用性と環境性能、走る楽しさを併せ持った、この水素内燃機関自動車が市場に出ることにより、水素社会の実現に向けた橋渡しになることを期待する。

参考文献

- (1) 柏木ほか：RX-8ハイドロジェンREの紹介，マツダ技報，No.24，p.135-138 (2006)
- (2) 齊藤ほか：RX-8ハイドロジェンREデュアルフューエル制御システムの開発，マツダ技報，No.24，p.139-143 (2006)
- (3) 柏木：水素エンジン車の開発，自動車技術，Vol.62，No.11，p.53-57 (2008)
- (4) M. M. Swamyほか：永久磁石形同期電動機の電子巻線切替による速度範囲の拡大方法，平成16年電気学会産業応用部門大会，p. 187-190 (2004)
- (5) 株式会社安川電機：「電磁鋼板形成体，電磁鋼板積層体，これを備えた永久磁石形同期回転電機用回転子，永久磁石形同期回転電機，該回転電機を用いた車両，昇降機，流体機械，加工機」，特開2008-236890，2008.10.2

著者



若山敬平



米盛 敬



松島智善



瀬尾宣英