ハイブリッド車用電力貯蔵装置に関する考察

The consideration of energy storage device for hybrid vehicle

石川哲浩*

Tetsuhiro Ishikawa*

The number of Hybrid Vehicles, like 'Prius,' has been growing in the market worldwide in order to help decrease CO₂ emissions. And Toyota Motor Corporation began leasing a new generation fuel cell vehicle the FCHV (Fuel Cell Hybrid Vehicle) in December 2002. That vehicle includes a new variable voltage power electronics system and uses the Nickel Metal Hydride (Ni-MH) battery system from the Prius hybrid gasoline electric vehicle. This paper describes on-going efforts to model optimum secondary storage systems for future vehicles. Efficiency modelling is presented for the base Ni-MH storage system, an ultra capacitor system and a Lithium ion (Li-ion) battery system. The Li-ion system in combination with a new high efficiency converter shows a 4 % improvement in fuel economy relative to the base system.

KEYWORDS : Fuel-cell, Hybrid, Efficiency, Power storage device

1. はじめに

地球温暖化が問題視されている中、二酸化炭素を発生する輸送体である自動車の増大が懸念されている。Fig.1に二酸化炭素の増加の状況を示す。

その中で二酸化炭素の排出量を低減したガソリンハイブリッド車や二酸化炭素の排出量がない燃料電池自動車の市場への投入がなされつつある。1997年に投入された量産ガソリンハイブリッド車は現在では月産1万台以上が生産され、累計のガソリンハイブリッド車は数十万台に達している。また、二酸化炭素の排出量がない燃料電池自動車はリース販売ながらも世界で数十台は市場に供されている。

Fig.1 Condition of atmospheric CO₂.

2. 高効率ハイブリッド車

このようなガソリンハイブリッド車や燃料電池ハイブリッド車が二酸化炭素排出量低減が可能な主な理由として2点ある。それは、軽負荷時の間欠運転制御と減速時の回生制動である。以下にその2点について詳述する。

2.1 軽負荷間欠運転制御

車両の動力の動作点は設備のような一定点での動作というのではなくて路面状況や運転者の要求にあわせて軽負荷から高負荷まで、停止や低回転から高回転域まで多岐の要求が出てくる。このような状況下では主動力源であるガソリンエンジンや燃料電池の動作点も要求に応じて目まぐるしく変化する。このとき効率として重要になるのが、それぞれの主動力源の効率特性がどのようなになっているかである。

Fig.2 Comparison of net efficiency of fuel cell and engine (in Japan 10-15 Mode).

* Corresponding Author, E-mail: tetsu@ishikawa.tec.toyota.co.jp

(平成 17 年 7 月 27 日受理, 平成 17 年 8 月 5 日採択)

トヨタ自動車株式会社バートルレーン本部HVシステム開発部: 〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町1番地

TOYOTA MOTOR CORPORATION, Hybrid Vehicle System Engineering Div.: 1 Toyota-Cho, Toyota City, Aichi 471-8571, Japan

ガソリンエンジンと燃料電池のネット効率をFig.2に示す。出力特性の軽負荷時にはともに効率が悪い。これは燃料電池においては、燃料電池単体では軽負荷時には効率は向上するのだが燃料電池の周辺機器であるエアコンプレッサーモータや燃料電池本体の冷却用ポンプモータの消費電力があるのでネット効率としては低下してくる^{1), 2)}。また、ガソリンエンジンでは軽負荷時には燃焼効率の低下と冷却ポンプなどの機械損失の比率が増大するためにネット効率としては低下してくる³⁾。

軽負荷間欠運転制御は、このような主動力源の軽負荷時の低効率な領域では主動力源を停止して別の動力源で車両を駆動させようという制御である。ここでいう別動力源が電池などの電力貯蔵装置である。

2.2 回生制動

2つめの二酸化炭素排出量低減が可能な理由として車両の減速エネルギーをモータを発電機として回生制動することによりエネルギー回収可能なことにある。同様な理由で燃料電池車も車両の減速エネルギーを回収する機構にすることにより燃料電池機構のネット効率が良いことにも増してさらに効率を向上させることが可能となる。ただ、この場合ガソリンエンジンでは可逆反応ができないので何らかのエネルギー貯蔵装置が必要となってくる。また、燃料電池においては、基本的には水の電気分解は可逆反応なので減速エネルギーは水素に戻すことは可能なのだが、このように燃料電池の出力端に燃料電池より高い電圧を印加して逆電流を流そうとすると燃料電池本体の膜全面に水が存在しないと燃料電池本体の寿命が低下すると言われている。よって、燃料電池車にも減速エネルギーを貯蔵する装置が必要となってくる。

2.3 高効率ハイブリッドシステム

前項で述べてきたように、主動力源の軽負荷時には主動力源を停止させて効率向上を図る軽負荷間欠運転制御や回生制動による減速エネルギーの回収を実現するために主動力源とは別の動力源を加えたものが高効率を実現できるシステムである。また、その動力源はエネルギーの出し入れが可能な動力源であることは言うまでもない。世にあるエネルギー貯蔵体としては機械的に貯蔵するものから電気化学的に貯蔵するものまで多々存在するが、燃料電池車を含めたハイブリッド車では車両の減速エネルギーを回収する方法がモータと電力変換器であるインバータを用いて機械エネルギーを電気エネルギーに変換しているので電気化学的に貯蔵する方法が効率的にみても有利である。すなわち電池に代表される電力貯蔵装置が適している。これらのことから考えると付加される動力源としては電気のでエネルギーを貯蔵できる形態が効率的にみても優位である。よって、現在製作されて世に市販されているハイブリッド車では主動力源に付加される動力源としては電池に代表される電力貯蔵装置が大半である。

ただ、電気化学的な電力貯蔵装置の中にも種々の特性をもった貯蔵装置がある。これらの中からハイブリッドに適した貯蔵装置を見極めることが次なる課題となるが、その見極め方としてはハイブリッドの主電源の特性を十分把握することが必要となっ

くる。次項では燃料電池ハイブリッド車を例にとって燃料電池車にとっての最適な電力貯蔵装置について述べる⁴⁾。

3. 燃料電池ハイブリッド車

3.1 燃料電池ハイブリッドシステム

今回検討のベースにしたトヨタFCHVシステムの概要を以下に示す。特徴としては、回生によるエネルギー回収を考慮して二次電池との電源ハイブリッドにして、二次電池は高信頼性で実績のあるNi-MH電池を採用。また、燃料電池と二次電池の出力比率はモード走行の燃費を考慮して燃料電池90kW、二次電池21kWとした(Table 1参照)。両電源間には使用電圧範囲を考えてブリッジ方式の昇降圧コンバータを、また、コンバータはリップル電流低減を目的として三相チョップ方式を採った¹⁾。

3.2 電源ハイブリッド構成

燃料電池とハイブリッドにする電力貯蔵装置はどのような特性が最適なのかを以下に示す。

3.2.1 電力貯蔵装置

燃料電池の特性に見合う電力貯蔵装置を見極めるために下記2点の観点からアプローチを行った。なお、参考としてトヨタFCHVと同クラスのガソリンHVとの比較も同時に行った。

(1) パワー応答性

燃料電池の出力応答性をFig.3に示す。燃料電池の出力応答性

Table 1 System scheme of power source for Toyota FCHV.

Fuel Cell Specification

Type	Polymer Electrolyte
Fuel	Hydrogen
Maximum Power	90kW

Battery Specification

Type	Sealed Nickel Metal Hydride
Capacity	6.5Ah
Cooling	Forced Air Cooling

Fig.3 Fuel cell response (at WOT).

はガソリンHVのエンジンに比べて早いので電力貯蔵装置からの持ち出しエネルギー量は小さい。

(2) ネット効率

燃料電池システムは駆動出力の小さい領域までネット効率がガソリンHVに比べて良いので燃料電池間欠運転領域がガソリンHVのエンジン間欠運転領域に比べて狭い。よってモード走行時ガソリンHV車と比べると間欠時間が短く電力貯蔵装置からの充放電量は小さくてすむ。**Fig.4**にLA#4モードを走行させたときの電池SOC変化量の試算結果を示す。燃料電池システムのほうがガソリンHVに比SOCの変化量が小さいのがわかる。

以上2点よりFCHVシステムとしては電力貯蔵装置に対してエネルギー型よりはパワー型の電力貯蔵装置が適している。

パワー型の電力貯蔵装置では、Li電池、パワーキャパシタなどが現状技術では存在する(**Fig.5**)が、それらの各電力貯蔵装置についての検討結果を以下に示す。

3.2.2 パワーキャパシタ

キャパシタの場合、キャパシタの仕様をいくつにするかが重要な鍵となる。高電圧電気回路構成は、当然キャパシタの使用電圧範囲が広い特性を利用して**Fig.6**に示すようなコンバータレスの構成が妥当である。しかし、この場合燃料電池からの出力は負荷

と電圧のみで決まってくるので各電源からの出力は制御できない構成となる。

Fig.6 Capacitor system high-voltage circuit configuration.

Fig.4 Amount of battery SOC change during operation in LA#4 mode (simulation).

Fig.5 Ragon plot characteristics for different electrical power storage devices.

Table 2 Specification of the system for verification.

Maximum Motor output [kW]	3.5
Maximum FC output [kW]	4.28
FC voltage area [V]	96-50
Capacitor capacitance [F]	39.2
Capacitor resistance [ohm F]	3.3

Fig.7 Congruence of simulated and actual results in mode operation.

キャパシタの容量などの仕様の決め方として車両としての加速減速およびその繰り返し、モード走行の減速エネルギーの回収を前提に考えなければならないが、それらを検討するシミュレーションモデルの妥当性を実機評価結果との比較にて行った。モデルおよび実機評価は、トヨタFCHV実車相当をスケールダウンしたもので行った。検証用システムの仕様をTable 2に示す。また、

Fig.8 Congruence of simulated and actual results in acceleration and deceleration.

Fig.9 Fuel cell maximum output and capacitor output.

Fig.7にはモード走行時のデータを、Fig.8には加減速を繰り返したときの実機評価結果と試算値を示す。結果としては誤差3%でモデルは、ほぼ同定できている。

本モデルを用いて車両加減速などのパラメータスタディーした結果をFig.9に示す。車両としての加速性能要求を満足しつつ、その加速の平坦路での繰り返しを行ったときにモータ設計電圧を下回らない限界線を示している。この図より斜線部分が所定の要求を満足する領域となり、燃費上最も良くなるポイントは、キャパシタ容量7F、燃料電池最大出力95kWである。

3.2.3 Li電池

Li電池を用いたシステムでのLi電池と燃料電池の出力比率をパラメータとしたときの燃費特性をFig.10に示す。Li電池出力：燃料電池出力が4：6～2：8が燃費上最良。よって、燃料電池出力を90kW、Li電池出力を30kWとする。

3.3 燃料電池ハイブリッド高電圧システム構成

前項で検討してきた燃料電池に適したハイブリッド電源のそれぞれに対しての高電圧電気システム回路構成を以下に示す。

3.3.1 パワーキャパシタシステム

先に述べたようにパワーキャパシタを用いた場合にはパワーキャパシタの使用電圧範囲の広さを利用して燃料電池とは並列接続とした高電圧電気システム構成とする。

3.3.2 Li電池システム

Li電池を電力貯蔵装置に用いた場合、使用電圧範囲が限定されるのでコンバータが必要となってくる。しかし、Li電池は高パワー密度であるのでコンバータ回路構成をブリッジタイプから効率の良いハーフブリッジタイプに変更可能となる。その状況をFig.11に示す。ハーフブリッジ化には燃料電池の使用電圧範囲とLi電池使用電圧範囲を離すことが必要となるが電池モジュール数を60モジュール以下にすれば可能となる。また、変圧比が上昇することによるコンバータ損失増大を考慮してもブリッジタイプよりハーフブリッジタイプの方が良いことがわかる。

3.3.3 燃費特性

前項で述べた高電圧システム構成での燃費比較をTable 3に示す。現行システムのNi-MHシステムに対してLi電池システムが

Fig.10 Fuel Cell maximum output and Li-ion battery output.

Fig.11 Efficiency of Li-ion system.

Table 3 Comparison of fuel economy in LA#4 mode.

	Capacitor	Ni-MH	Li-ion
Volume [L] (with converter & FC stack)	235	220	196
Weight [kg] (with converter & FC stack)	259	252	206
Fuel economy index (Ni-MH=100)	93.7	100	104.2
Fuel economy Improvement [%]	11.3	4.2	UP

Fig.12 Comparison of loss in different systems.

燃費上最も良く、現行システムに対して約4%の燃費向上が可能。
パワーキャパシタシステムは燃料電池の間欠運転ができないので
Fig.12に示すように補機損失が増大して燃費は現行システムよ

Fig.13 Voltage and power transitions in capacitor system.

Fig.14 SOC and loss transitions in Li-ion battery system.

り悪化する。

各システムでのモード走行時の各部位の損失推移と電圧、SOC
の変化状況をFigs.13, 14に示す。コンバータを用いているNi-
MHやLi電池システムでは車両停車時および減速による回生時
には燃料電池間欠運転が可能となり燃費がよい。

3.4 まとめ

- (1) 燃料電池システムの特性を踏まえた最適電力貯蔵装置であるLi電池と高効率なハーフブリッジ式コンバータ回路を採用した高効率な次世代FCHV高電圧システムを導き出した。
- (2) 本システムでは二次電池の軽量化およびコンバータ損失低減により燃費を現状のトヨタFCHVより約4%向上させることが可能。
- (3) パワーキャパシタを用いたシステムでは燃料電池の間欠運転ができないために燃費はLi電池を用いたシステムより11%劣ることがわかった。

4. ハイブリッド車用電力貯蔵装置に関する考察まとめ

以上燃料電池車のハイブリッド用電力貯蔵について詳細検討内容を述べてきたが、重要なことは車両からの要求特性とハイブリッドにすべく主電源および電力貯蔵装置の特性を踏まえて最適な貯蔵装置を選択しなければならないということである。特

に電力貯蔵装置の技術進歩は目を見張るものがあるので、その技術進歩に応じて最適システム構成は変わる可能性がある。現在の貯蔵装置を踏まえたシステム構成が未来永劫最適とは限らないということでもある。

文 献

- 1) T. Matsumoto, N. Watanabe, H. Sugiura and T. Ishikawa, "Development of Fuel-cell Hybrid Vehicle", the 2002 SAE World Congress (2002).
- 2) Y. Hori, T. Teratani and R. Masaki, "Motor Technology for Automobile", The Nikkan Kogyo Shimbun, LTD (The Business & Technology Daily News) (2003).
- 3) S. Sasaki, T. Takaoka, H. Matsui and T. Kotani, "Toyota's Newly Developed Electric-Gasoline Engine Hybrid Power train System", The 14th International Electric Vehicle Symposium (1997).
- 4) T. Ishikawa, S. Hamaguchi, T. Shimizu, T. Yano, S. Sasaki, K. Kato, M. Ando and H. Yoshida, "Development of Next Generation Fuel-cell Hybrid System", the 2004 SAE World Congress (2004).