

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

10

“i-ELOOP” 制御技術の開発

Development of Control Technology for “i-ELOOP”

小谷 和也 ^{*1}	水落 洋行 ^{*2}	久米 章友 ^{*3}	湯原 将光 ^{*4}
Kazuya Kotani	Hiroyuki Mizuochi	Akitomo Kume	Masamitsu Yuhara
高木 宏 ^{*5}	中上 信宏 ^{*6}	春名 亮二 ^{*7}	田村 和寛 ^{*8}
Hiroshi Takaki	Nobuhiro Nakagami	Ryoji Haruna	Kazuhiro Tamura

要約

マツダは、技術開発の長期ビジョンである「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき、「ビルディングブロック戦略」を推進している。車の基本となるエンジンの効率向上、車両の軽量化などを実施し、段階的に電気デバイス技術を組み合わせることで、CO₂の総排出量を削減していく。そのStep2として、減速時の運動エネルギーを回生し、車の使用電力として再利用する減速エネルギー回生技術であるi-ELOOPを導入する。i-ELOOPでは、新たにキャパシタ（EDLC：Electric Double Layer Capacitor）、可変電圧オルタネータを採用することで、回生能力を向上させた。更に新たな制御技術を採用することで、より多くの減速エネルギーを回生することが可能となった。

Summary

Based on the technology development long-term vision, “Sustainable Zoom-Zoom”, Mazda has been promoting the “Building Block Strategy”. We thoroughly improve the base technologies for Powertrain efficiency, vehicle weight reduction while combining them with electric devices technology in a phased manner so as to reduce CO₂ emission. In the second step of this approach, we have developed a new regenerative braking system “i-ELOOP” that recovers energy generated by deceleration and reuses it as electric energy necessary for vehicle. i-ELOOP, because of a new capacitor (EDLC: Electric Double Layer Capacitor) and variable voltage alternator, improves the regenerative capability as the vehicle decelerates. A new control technology is also employed to recover braking energy in a stable manner so as to minimize fuel consumption for power generation.

1. はじめに

マツダは、技術開発の長期ビジョンである「サステナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき、「ビルディングブロック戦略」を推進している。車の基本となるエンジンの効率向上、車両の軽量化などを実施し、段階的に電気デバイス技術を組み合わせることで、CO₂の総排出量を削減していく。「ビルディングブロック戦略」に基づき、2009年から停車時にエンジンを停止させ、燃料消費を削減するi-stopを導入した。今回、減速時の運動エネルギー（以下、減速エネルギー）を回生し、車の使用電力として利用するi-ELOOPを導入する。

本稿では、i-ELOOPにおける制御技術について紹介する。

2. i-ELOOPのねらい

従来、市街地を走行する際、エンジン出力の約10%は、車の使用電力を供給するための発電負荷として利用している。安全装備や環境対策技術等の電装品追加に伴い、車の使用電力は増え発電負荷は増加傾向にある。一方、燃費改善のため、車両の軽量化、空気抵抗の低減等が進むことで走行負荷は減少傾向にある。つまり、エンジン出力に占める発電負荷の比率は更に高まる傾向にある（Fig.1）。そこでi-ELOOPは回生能力を向上させ、多くの減速エネルギーを回生し発電負荷をなくすことを目指した。

*1~8 パワートレインシステム開発部
Powertrain System Development Dept.

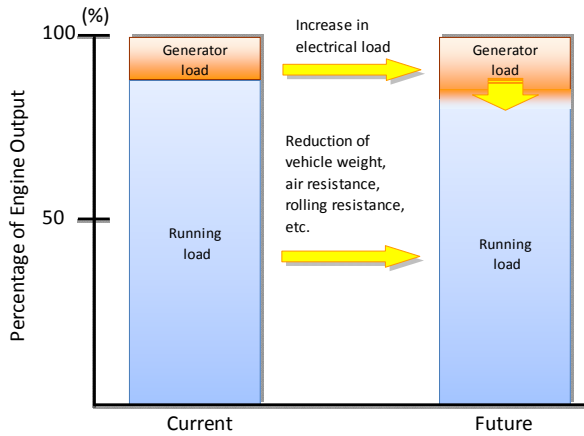


Fig.1 Rate of Generator Load

多くの減速エネルギーを回生するため、発電装置は最大電圧 25V、最大電流 200A の発電性能を持つ可変電圧オルタネータを採用した。減速の限られた時間で多くのエネルギーを蓄えるため、蓄電装置は鉛バッテリーの 10 倍以上の充電受入性能を持つキャパシタを採用した。キャパシタに蓄えたエネルギーは、DC-DC コンバータで電装品に適した電圧に変換、供給する (Fig.2)。

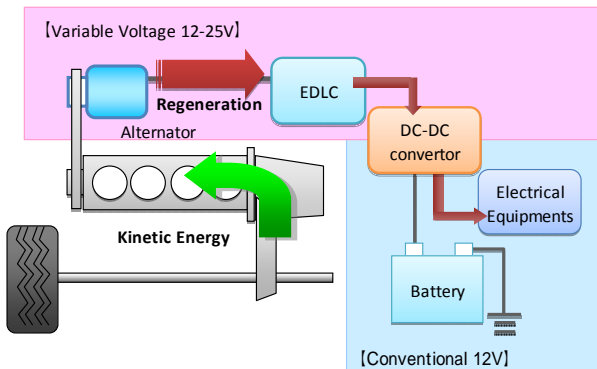


Fig.2 Schematic View of i-ELOOP

i-ELOOP は可変電圧オルタネータとキャパシタを採用することで、従来比約 3 倍の減速エネルギーを回生する能力を得た。しかし、回生する際は減速度がドライバに違和感を与えないよう発電トルクを制限するため、発電能力を最大限利用できない可能性がある。また、減速時にキャパシタの充電状態 (以下、SOC : State Of Charge) が満杯だと減速エネルギーを充電できない可能性がある。これらの懸念を解決するためには、違和感を与えない最大限の発電トルクを明確にして、精度良く発電する必要がある。また、次の減速で得られる減速エネルギーを推定し、キャパシタ SOC を減速エネルギーが充電できる状態にする必要がある。よって、i-ELOOP は新たな制御技術として、可変電圧オルタネータ制御とデュアルストレージ制御を開発した。更に、加減速が少ない走行シーンでも発電による燃料消費を最小に抑える高効率発電制御も採用している。

3. i-ELOOP 制御技術

3.1 可変電圧オルタネータ制御

可変電圧オルタネータは従来の約 3 倍の発電能力を有しており、多くの減速エネルギーを回生する能力がある。一方、減速時の発電量が多いと発電トルクが原因で、ドライバが期待している減速度を超えてしまい違和感を与えてしまう。そこで、可変電圧オルタネータ制御では、ドライバに違和感を与えない範囲で回生できる最大発電トルク (以下、最大回生トルク) を演算する。そして、最大回生トルクを精度良く実現することで、可変電圧オルタネータの発電能力を最大限利用する。

ドライバの操作から違和感を与えない減速度 (以下、許容減速度) は、アクセルペダルとブレーキペダルの操作から推定する。アクセルペダルを離れた際は、車速の低下に応じて許容減速度をリニアに変化させる (Fig.3)。ブレーキペダルを操作した際は、油圧ブレーキの制動力に応じて許容減速度を変化させる (Fig.4)。最大回生トルクは、走行抵抗、パワートレイン抵抗から算出した減速度と許容減速度の差から逐次演算する。以上から、ドライバに違和感を与えることなく回生できる発電トルクの最大値を演算可能となった。

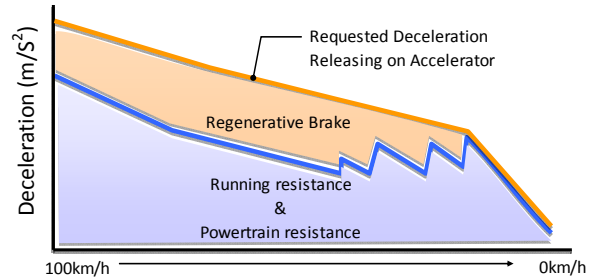


Fig.3 Acceptable Deceleration

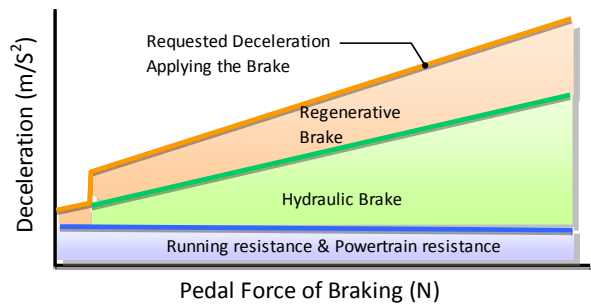


Fig.4 Acceptable Deceleration with Braking

最大回生トルクで減速エネルギーを回生するためには、許容減速度を超えないよう目標発電トルクを精度良く実現する必要がある。これまでのオルタネータ制御は、発電による電圧変動が電装品の動作に影響しないように電圧制御を行っていた。回生の際は目標発電トルクとなる目標電圧を推定して発電するため、実発電トルクは推定誤差の影響を受けた。i-ELOOP は電装品の電力供給を DC-DC コンバータで行うため、発電トルクを目標として制御する構造に

変更し、推定誤差の影響を排除した。目標発電トルクは、ロータに励磁電流を流すことで実現するが、励磁電流はロータ温度によって影響を受ける。そのため、ロータの実励磁電流をフィードバックすることで、励磁電流を高精度に制御している。結果、回生によってロータ温度が変化しても目標発電トルクを高精度に実現することが可能となった (Fig.5)。

以上の制御によりドライバへ違和感を与えることなく、発電能力を最大限利用した減速エネルギー回生を実現している (Fig.6)。

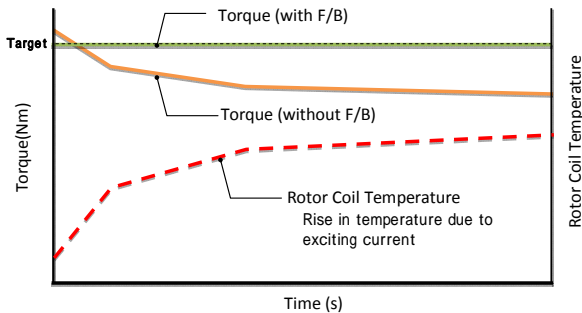


Fig.5 Effect of Feedback Control

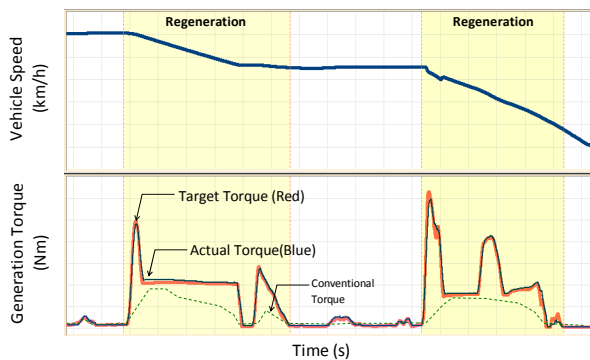


Fig.6 Effect of New Torque Control

3.2 デュアルストレージ制御

キャパシタは大電力を高効率に充電することができるが容量は限られるため、満杯になり減速エネルギーを充電できない場合がある。一方、鉛バッテリーは、大きな容量を有しているが充放電の効率が低いため、充放電によってエネルギー損失が大きくなる。そのため、キャパシタと鉛バッテリーの異なる特性を活かし、2つの蓄電装置を最大限活用するデュアルストレージ制御を行っている (Fig.7)。

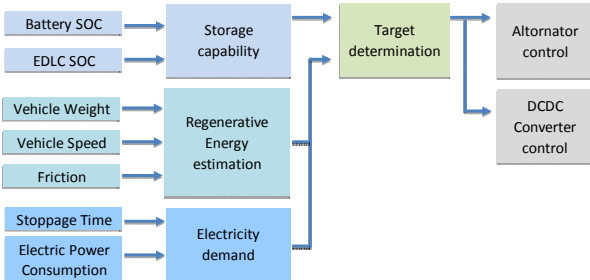


Fig.7 Dual Storage Control Structure

減速エネルギーをキャパシタへ充電するためには、次の減速までにキャパシタ SOC を下げておく必要がある。一方、キャパシタ SOC を下げるためにエネルギーを鉛バッテリーへ移動させると、充放電にともなうエネルギー損失が発生する。そこで、減速エネルギーを充電できるキャパシタ SOC を演算し、鉛バッテリーへ移動させるエネルギーを最小にしている。具体的には、車両重量、車速、エンジン抵抗、車両走行抵抗等を用いて、次の減速時に得られる減速エネルギーを逐次演算する。演算した減速エネルギーを充電できる SOC を目標 SOC と定め、目標 SOC を上回るエネルギーを鉛バッテリーに移動させる (Fig.8)。

この制御によって、キャパシタと鉛バッテリーを最大限活用して、減速エネルギーを充電することが可能となった。その結果、キャパシタの容量は一般的な減速 1 回分の減速エネルギーを充電できる容量となり、システムの小型化に貢献している。

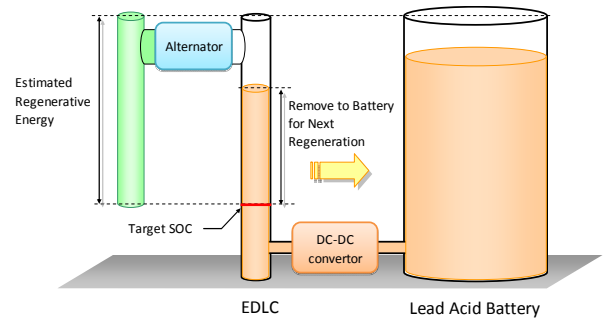


Fig.8 Image of SOC Control

更に、停車時には減速エネルギーによってキャパシタが満杯となり、アイドルストップ中の使用電力をキャパシタで供給可能となる。その結果、鉛バッテリーの充放電量は従来の半分以下になり、寿命を延ばすことが可能となった (Fig.9)。

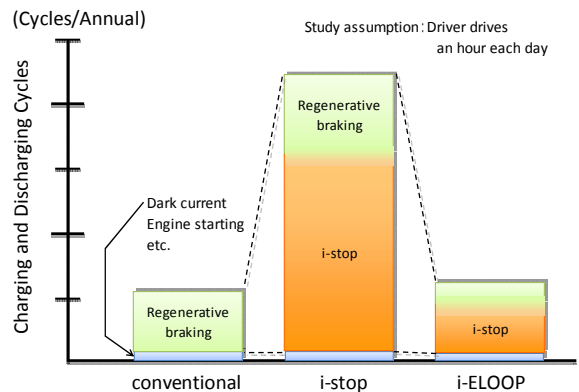


Fig.9 Charging and Discharging Cycles with Lead Acid Battery

3.3 高効率発電制御

可変電圧オルタネータ制御、デュアルストレージ制御によって多くの減速エネルギーを回生することが可能となった。それでも、加減速の少ないシーンにおいては減速エネルギーが少ないため、燃料を使用して発電する必要がある。そのため、エンジンの燃焼効率とオルタネータの発電効率を考慮し、発電による燃料増加量が最小となるように高効率発電制御を行っている。

エンジンの燃焼効率は同じ回転速度でも負荷状態によって異なるため、同じ発電負荷を与えても燃料増加量は変化する。更に、負荷状態は、走行環境、ドライバの走り方で変化するため、燃料増加量が最小となる発電タイミングを見極める必要がある。そこで、エンジンの燃焼効率特性、負荷状態から、単位発電負荷あたりの燃料増加量を発電燃料消費率(以下、発電燃費)として逐次算出している (Fig.10)。発電燃費は過去の平均発電燃費と逐次比較することで、現状の走行における燃料増加量が最小となる発電タイミングを見極めることができる。

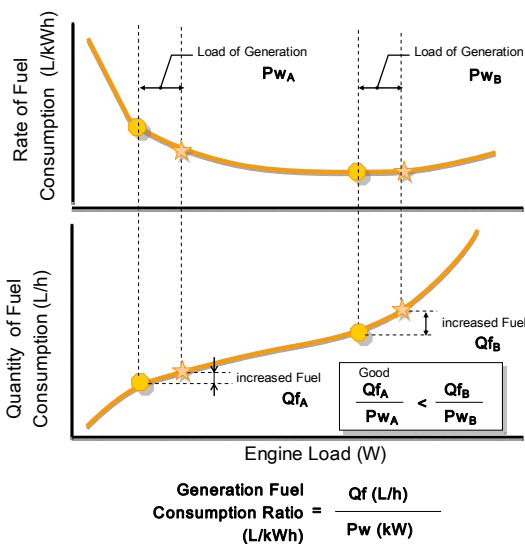


Fig.10 Fuel Consumption Ratio by Generation

見極めたタイミングで発電を行う際は、同じエネルギーからより多くの電力を得るため、オルタネータの発電効率が高い領域で発電している。発電効率の高い領域は、発電電力が平均的な使用電力を上回るため、使用電力を超えた分はキャパシタへ充電している (Fig.11)。そこで、発電は目標 SOC を超える前に停止し、その後、キャパシタへ充電したエネルギーを電装品に供給している (Fig.12)。この制御により、同じ電力を発電するための発電負荷は、最大20%低減され発電による燃料増加を最小にすることが可能となった。

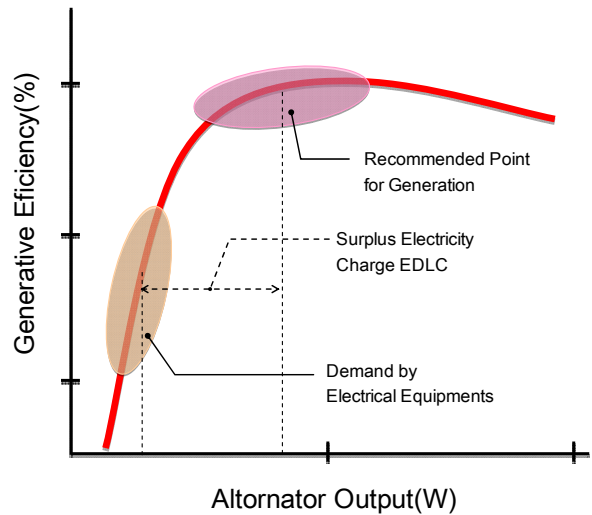


Fig.11 Recommended Point for Generation

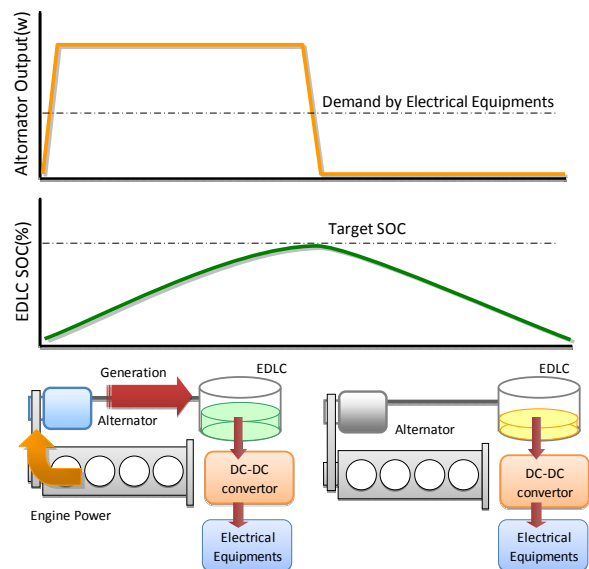


Fig.12 Example of System Operation

4. おわりに

新たに採用した制御技術によって、可変電圧オルタネータ、キャパシタの能力を最大限活かし、減速エネルギーを回生することが可能となった。

減速エネルギー回生技術は車の燃費向上にとって重要な技術であり、引き続きより多くの減速エネルギーを回生できるよう開発を続ける。更にビルディングブロック戦略に基づき、回生したエネルギーを利用する技術を開発し、マツダ車の更なる進化に貢献してゆく。

参考文献

- (1) 吉田ほか：新型デミオ向けバッテリーマネジメントシステムの紹介，マツダ技報No.29，pp.14-19 (2011)
- (2) 久米ほか：次世代バッテリーマネジメント技術の開発，マツダ技報No.28，pp.54-58 (2010)
- (3) 西里ほか：バッテリーマネジメントによる燃費改善，マツダ技報No.25，pp.152-156 (2007)
- (4) 猿渡ほか：マツダ i-STOP (アイ・ストップ)，マツダ技報No.27，pp.9-14 (2009)

著者



小谷 和也



水落 洋行



久米 章友



湯原 将光



高木 宏



中上 信宏



春名 亮二



田村 和寛