電気二重層キャパシタを用いたハイブリッド電源鉄道車両の シンプルなエンジン出力制御法

学生員 岡野 翔太* 正 員 澁谷 浩之* 上級会員 近藤圭一郎*

Study on a Simple Method for Controlling the Engine Output Power of Hybrid Powered Railway Vehicles with Electric Double Layer Capacitors

Shota Okano*, Student Member, Hiroyuki Shibuya*, Member, Keiichiro Kondo*, Senior Member

(2011年4月26日受付, 2011年6月22日再受付)

This paper presents a simple and energy-saving method for controlling hybrid powered railway vehicles that run on rural non-electrified railway lines and have diesel engine and electrical double layer capacitors (EDLCs). The aim this study is to reduce both the fuel consumption and the capacitance of EDLCs. A basic idea proposed in this paper is that EDLCs supply and absorb the kinetic energy of the vehicle and the engine output compensates supply the energy loss with the vehicle running. Thus, the energy loss is not taken into consideration while expressing the EDLC voltage reference (equation 1); energy loss is considered when the engine is in operating mode. The proposed method is examined by performing numerical simulations for various values of engine operation time, load, and grade section. The results of this study reveal the relationship between the capacitance of the EDLCs and the fuel consumption. Using this proposed control methods, excessive charging of EDLCs can be avoided. The results of this study are expected to expedite the development of energy-saving railway vehicles for the non-electrified lines.

Finally, the results of this study increase the possibility of developing hybrid powered railway vehicles.

キーワード：ハイブリッド電源鉄道車両, 電気二重層キャパシタ (EDLC), エネルギーストレージ, エネルギーマネジメント

Keywords: hybrid powered railway vehicle, electrical double layer capacitor (EDLC), energy storage, energy management

1. まえがき

地方の非電化路線で使用されているディーゼルエンジンを用いた気動車は, その原理上, 回生ブレーキを使用することができない。そこで, ディーゼル発電システムと蓄電媒体を組み合わせたハイブリッド車両の実用化, 実証試験および研究開発が行われている^{(1)~(5)}。現在, 蓄電媒体としてはリチウムイオン電池 (Li-ion 電池) が多く適用されている。Li-ion 電池はエネルギー密度 (単位質量もしくは単位体積あたりの充放電可能エネルギーの総和) が高いことから, 架線レストラム⁽⁶⁾やバッテリー駆動電車⁽⁷⁾等, 長時間連続して大電力を出力するような用途に適している。しかし, Li-ion 電池は化学反応を伴うことからサイクル寿命が短く, 急速充放電に不向きである。一方, 電気二重層キャパシタ (EDLC) はエネルギー密度が低いいため, 長時間に

わたり力行電力を出力するのには不向きであるが, パワー密度 (単位質量もしくは単位体積あたりの入出力可能電力) が高いため, 短時間で高い運動エネルギーを吸収する回生電力吸収には適している。そのため, 力行時はディーゼル発電機や架線等の他の電源と組み合わせることが可能なハイブリッドシステム⁽⁸⁾に向いている。また, EDLC は原理的には化学変化を伴わない物理現象を用いた蓄電媒体であることから, Li-ion 電池の寿命面やパワー密度面でのデメリットをカバーできる。今後の蓄電媒体を応用した車両駆動システムの普及に伴い, バッテリーが必ずしも最適な蓄電デバイスでは無い場合の発生に備え, EDLC を用いたハイブリッドシステムについても具体的な検討の必要があると考える。

ディーゼルハイブリッドシステムでは, 回生エネルギーの有効活用と, エンジン動作頻度低減による省燃費が期待される。したがって, 蓄電媒体は蓄積されたエネルギーと運動エネルギーを吸収するに足る必要最低限の容量として, その小型軽量化やコストアップ抑制を図るべきである。エンジンは力行に際して不足するパワーや, 車両の走行に伴

* 千葉大学
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Chiba University
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 763-8522, Japan

う各種損失分を供給するための必要最小限の出力とすることが望ましい。

筆者らはこれまでも、車両の運動エネルギーと EDLC 蓄積エネルギーの和が一定となるようエンジン出力を調整して EDLC 電圧を制御する方法を提案している^{(5)~(10)}。しかしこの方式では、EDLC に対してエンジンからの過剰なエネルギー供給が起こるという問題があった^{(5)~(10)}。これは EDLC 電圧指令値に考慮された損失モデルと実際の損失との誤差によって過剰にエンジンから EDLC にエネルギーを供給するためである。

これに対し本研究では、EDLC 電圧指令値には損失を考慮せず、電圧偏差に応じてエンジン出力を調整することで EDLC エネルギーを十分に活用するシンプルな制御方法を提案し、この方式について搭載する EDLC 容量と燃料消費量との関係を明らかにする。この方式によれば、EDLC 蓄積エネルギーの過剰供給や、実際の損失と予測計算で得られる損失の誤差に起因するエンジンの余分な動作を抑制できることが期待される。

しかし一方で、勾配等の大きな負荷変動があった際に EDLC 電圧が大きく低下する。そこでエンジン動作を力行時に限定せず、EDLC 電圧が指令値に対して大きく低下した場合でも直ちにエンジン出力を供給できるようにすることについても検討を行う。なお、今回の検討では、排気ブレーキや抵抗発電ブレーキのように、回生電力[†]を吸収しない電気ブレーキは、エネルギーマネジメントの観点からは機械ブレーキと同じと考えられることから、装備しない前提としている。提案手法の有効性については数値シミュレーションによって燃料消費量の削減効果や EDLC 蓄積エネルギーの利用効率を以って評価を行う。この結果より、EDLC の搭載すべき最適容量の決定法を提示し、ハイブリッド鉄道車両の実現可能性を高めることを目的とする。

2. 主回路システムの概要

〈2・1〉 主回路システム構成 本研究で対象とするハイブリッド電源鉄道車両の主回路システム構成を Fig. 1 に示す。エンジンで発電した交流電力を PWM 整流器で直流電力に変換し、インバータで交流電力に変換して電動機を駆動する。EDLC は DC/DC チョッパを介して直流リンク部に接続されており、回生エネルギーの蓄積や、エンジンのパワーアシストも可能となっている。

〈2・2〉 車両性能 Table 1 に本研究で想定する非電化ローカル線向けの車両諸元を示す。また、力行時の駆動力特性と機械ブレーキも含めた制動力特性を Fig. 2 に示す。なお、ブレーキ力についてもその大きさを正の値で表している。回生時において、一定の減速度を得るためには高速域では回生ブレーキだけではブレーキ力が不足するため、摩擦力による機械ブレーキで補う。

[†] 電気鉄道における「回生」とは一般には、車両の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、架線に返すことを指すが、本論文ではこれを広義に解釈し、EDLC に返すことを指すものとする。

Fig. 1. Construction of the hybrid traction system.

Table 1. Specifications of an assumed vehicle.

Mass of the vehicle M_v (with full pay load M_f).	35.0 (51.87) [t]
Number of vehicle in a train	1
Acceleration at start up α	2.0 [km/h/s]
Maximum deceleration β	-2.0 [km/h/s]
Number of the traction motors	2 [motors/car]
The limit of the DC/DC converter current I_{cmax}	1200 [A]

Fig. 2. Traction and regenerative brake curves.

3. エンジン出力パワー制御法の検討

〈3・1〉 EDLC 電圧指令値によるエンジン出力制御法

駅発車時と次の駅到着時の EDLC 電圧を一致させることを基本方針とした上で、後述の (4) 式あるいは (5) 式で表される走行中の EDLC 電圧 V_c が従うべき指令値 V_{cref} を定義して、それと EDLC 電圧の偏差に応じてエンジン出力調整を行う。負荷（インバータ）電力を基準にフィードフォワードでエンジン出力を決定した上で、EDLC 電圧の偏差 $\Delta V_c = V_{cref} - V_c$ に応じて、フィードバック的にエンジン出力を調節する。エンジン出力は、エンジンの最大出力 MAX モードと、燃費率最小となる動作点での出力 OPT (Optical) モード、空調など補助電源装置の負荷（今回は 50 kW 一定と仮定）へのみ電力を供給する SIV (Static Inverter：補助電源装置の通称) モードの 3 段階とする。エンジン出力パワー制御・EDLC 電圧制御のブロック線図を Fig. 3 に示す。運転台からノッチ（トルク）指令と車両速度 v_t に基づき、インバータ入力電力 P_{inv} を決定する。だ行・ブレーキ時も含め、 P_{inv} が閾値 P_{th} より下回る場合に SIV モードに固定し、逆に $P_{inv} > P_{th}$ の領域では EDLC 電圧偏差 ΔV_c に従うフィードバック制御を行う (Fig. 4)。今回前提としているエンジン出力は、EDLC のパワーアシストの無いエンジ

Fig. 3. Block diagram of an engine output control system.

Fig. 4. Feed-forward engine output pattern.

単独でも十分な車両性能を実現し得るものである。そのため、Fig. 4 に示すように、 P_{opt} は車両性能の最大出力とほぼ同等な出力となっている。この特性は EDLC のエネルギーマネジメントを行なう上で、力行中に EDLC 蓄積エネルギーが不足しても車両性能を抑制することなく走行し続けるために、必要な場合には十分速くそのエネルギー（電圧）を回復でき、かつエンジンの効率も高く維持することを可能としている。すなわち、運動エネルギーを反映した EDLC 電圧指令値に非予測的かつ効率良く EDLC 電圧を追従させることができる。ところで、出力モードの切り替え時には Fig. 5 のようなチャタリング防止を目的としたヒステリシス特性を持たせている。今回の検討では、 $\Delta V_1 \sim \Delta V_4$ を次のように定めた。まず V_c と ΔV_c を可能な限り一致させるために $\Delta V_1 = -10V$, $\Delta V_2 = 10V$ とした。また、後に示す (4) 式において車両の最高速度時の電圧指令値を算出し、 V_c の下限値との間に 20% 程度の余裕を持たせるように $\Delta V_3 = 30V$, $\Delta V_4 = 50V$ とした。なお、モード切替のヒステリシス幅、すなわち、 $\Delta V_1 \sim \Delta V_2$ の差と $\Delta V_3 \sim \Delta V_4$ の差はどちらも 20V としているが、これは、エンジンモードがあまり頻繁に切り替わると実際のエンジンに比べて現実味がないため、モードが一度切り替わった後は最低でも数秒は切り替わらないようにするためである。また、エンジン出力は指令に遅れなく追従するものと仮定する。

〈3・2〉 損失を考慮した電圧指令値生成法 損失が無い理想的な条件では、EDLC のエネルギー E_c と車両の運

Fig. 5. Feed-back control rule of the engine output based on EDLC voltage error.

動エネルギー E_K は相互に 100% 変換可能であり、 E_c と E_K の和は常に一定となることから、 E_c は以下で表される。

$$E_c = \frac{1}{2}CV_{c0}^2 - \frac{1}{2}M_tv_t^2 \dots\dots\dots (1)$$

但し、 C は EDLC の静電容量、 V_{c0} は EDLC の初期電圧、 M_t は車両総質量、 v_t は車両速度である。しかし実際には主回路機器損失や走行抵抗、機械ブレーキによって E_c に変換できる E_K は減少する。したがってこれらを考慮して、EDLC の蓄積すべきエネルギーの指令値 E_{cref} として (2) 式とおく⁽¹⁰⁾。

$$E_{cref} = \frac{1}{2}CV_{c0}^2 - \frac{1}{2}(1 - K_{loss})M_tv_t^2 + E_{mb} \dots\dots\dots (2)$$

但し、 K_{loss} は主回路機器損失が運動エネルギーの一定割合となると仮定した場合の係数、 E_{mb} は車両速度 v_t をパラメータとした機械ブレーキで消費されるエネルギーであり、具体的には (3) 式で与える。

$$E_{mb} = \begin{cases} 0 & \text{for } v_t < v_b \\ \frac{F_{bmax}}{2\beta}(v_t - v_b)^2 & \text{for } v_t \geq v_b \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

なお、本検討では車両の力行性能と回生性能を同一とし、Table 1 に示した緒元の車両が減速度 $\beta = -2.0 \text{ km/h/s}$ を満たす最大回生ブレーキ力（定トルク領域における制動力） F_{bmax} を 32514 N、機械ブレーキ終端速度 v_b を 45 km/h とする。

ここで $1 - K_{loss}$ を改めて K_{gain} とおき、ある駅の発車時と次の駅の到着時で EDLC 電圧が等しくなるために、EDLC 電圧が従うべき電圧指令値 V_{cref} は $E_{cref} = 1/2CV_{cref}^2$ とすると、次のように求められる。

$$V_{cref} = \sqrt{\frac{2}{C} \left(\frac{1}{2}CV_{c0}^2 - \frac{1}{2}K_{gain}M_tv_t^2 + E_{mb} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

K_{gain} の具体的な数値は、今回想定する主回路機器効率を、歯車装置：0.98、モータ：0.92、インバータ：0.97、DC/DC チョップパ：0.98、フィルタリアクトル・EDLC：0.98 とし、これらを乗じて 0.84 とする。

〈3・3〉 提案する制御法 EDLC はエネルギー密度が低く、走行中に蓄電量が足りなくなる恐れがある。そのため先行研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾では EDLC 蓄積エネルギーの過度な不足を防ぐ狙いで (4) 式を提案していたが、(4) 式を用いて EDLC 電圧を制御する場合、 K_{gain} や E_{mb} に関しては、実際の値との間に誤差が生じてエンジンの不要な動作に繋がり、燃費が悪くなることが考えられる。それに対して今回の検討では、〈3・1〉節でも述べたように想定車両が搭載するエンジン容量がそれ単体でも走行可能なほど大きい。そのため、(1) 式の関係性をそのまま用いた (5) 式のような電圧指令値でも制御が成り立つと考え、提案する。この方式では、予測的な損失計算を省くことができ、その時々車両速度の情報を取得するだけで簡単に電圧指令値を決定できる。また、結果的に車両の運動エネルギーと EDLC 蓄積エネルギーの差分を補うようにエンジンが動作するため、余分な燃料消費を防止することが期待できる。

$$V_{\text{cref}} = \sqrt{\frac{2}{C} \left(\frac{1}{2} C V_{c0}^2 - \frac{1}{2} M_t v_t^2 \right)} \dots \dots \dots (5)$$

4. 提案方式の数値シミュレーションによる制御特性評価の検討

〈4・1〉 シミュレーション条件 提案する EDLC の電圧制御法の特性を数値計算による走行シミュレーションによって検証する。シミュレーションでは、実在の近郊路線を参考に、各駅停車列車を想定し、停車駅数を 10 駅、総走行距離 15.2 km、総走行時間を 1174.5 s とする。なお、各駅での停車時間は考慮していない。車両の各種諸元と走行パターンを、Table 2 および Fig. 6 に示す。駅間ごとの設定最高速度に達したらだ行に入り、走行抵抗により速度が低下したら再加速する、いわゆる「のこぎり運転」を行う。

P_{th} は、MAX モード時のインバータ入力パワーから SIV の消費電力を差し引いた値をもとに、OPT モード時の電力を比例配分して 214.2 kW と定めた。

搭載する EDLC の基準容量については、文献 (5) において次のように決定した。力行に必要なパワーと回生エネ

ギーをすべて EDLC でやり取りする場合、充放電電流が DC/DC チョップパの IGBT 電流制限 1200 A 以内、且つ、回生エネルギー回収に必要な最小限度の容量として、 $V_{c0} = 550 \text{ V}$ より $C = 51.7 \text{ F}$ と定めた。EDLC 電圧については上限を耐電圧に 1% の余裕を持たせた 594 V、下限を電流制限から 218 V とする。なお、EDLC 電圧が下限に達した場合は EDLC のパワーアシストはストップしてエンジンを MAX モードで動作させ、力行に必要なパワーは全てエンジンから供給するような電圧下限リミットを設けている。また、この時のエンジン出力の余剰分は EDLC に供給される。

〈4・2〉 従来方式の課題と提案方式のシミュレーション結果 従来方式である (4) 式を電圧指令値として用いた場合の、 V_c と V_{cref} および EDLC 電流 I_c の時間推移を Fig. 7(b) に示す。 V_c はおおよそ V_{cref} に追従するが、各駅での停車の際に、EDLC 電圧が初期値の 550 V をわずかに上回ることがある。EDLC 電流 I_c は DC/DC チョップパの IGBT の最大電流から決めた 1200 A 以内となっている。

今回提案した (5) 式の電圧指令値を適用した場合について、 V_c と V_{cref} の時間変化は Fig. 8(a) のようになった。車両が最高速度に達するとき V_{cref} は 0 に達するが、これは (5) 式で車両の運動エネルギーと EDLC 蓄積エネルギーが 100% 相互変換されると想定しているためである。しかし、実際には電圧下限リミットによって EDLC 電圧の低下は抑制され、最低でも 218 V が保たれている。前述のように、この場合、エンジンは MAX モードで動作する。駅停車時、 V_c は V_{cref} を下回るが、この場合も V_c はおおよそ V_{cref} に追従する。 I_c は Fig. 8(b) に示すように、車両が最高速度に達した際 1200 A 以内となっている。また、燃料消費量については同シミュレーション内の計算から、従来方式による制御の場合 7267 g、提案方式による制御の場合 7226 g であり、提案方式による制御の方が燃料消費量を抑えられることが分かった。これは、従来方式が損失を考慮して EDLC 蓄積エネルギーに余裕をもって走行するのに対し、提案方式では EDLC の充放電深度が深い分 EDLC 蓄積エネルギーを最大限活用することができ、エンジン動作頻度の減少に繋がったためである。

〈4・3〉 EDLC 容量と燃料消費量の関係 従来方式と提案方式の電圧制御のそれぞれにおいて、シミュレーションより得られた搭載する EDLC 容量と燃料消費量の関係を Fig. 9 に示す。いずれの場合も燃料消費量は EDLC 容量におおよそ反比例することがわかる。また、提案方式による電

Table 2. Specifications of the Hybrid Traction System for the Numerical Simulations.

Max. output power P_{max}	336 [kW]
Fuel consumption optimized power P_{opt}	275 [kW]
Engine power for an auxiliary power unit P_{siu}	64 [kW]
Fuel consumption ratio for P_{max}	207 [g/kWh]
Fuel consumption ratio for P_{opt}	201 [g/kWh]
Fuel consumption ratio for P_{siu}	225 [g/kWh]
EDLC voltage control starting threshold value P_{th}	214.2 [kW]
Required power by auxiliary power unit	50 [kW]
Upper limit of the EDLCs voltage V_{clim1}	594 [V]
Lower limit of the EDLCs voltage V_{clim2}	218 [V]
Initial voltage of the EDLCs V_{c0}	550 [V]
Capacitance of the EDLCs C	51.7 [F]
Mass of the vehicle with full pay load. M_t	51.87 [ton]
Max vehicle speed v_{tmax}	70 [km/h]

Fig. 6. Running pattern of train.

(a) EDLC voltage.

(b) EDLC current.

Fig. 7. Simulation result of the conventional control ($C = 51.7$ F).

(a) EDLC voltage.

(b) EDLC current.

Fig. 8. Simulation result of the proposed control ($C = 51.7$ F).

圧制御の場合，従来方式で必要最低限のEDLC容量51.7FではEDLC容量が不足するが，燃料消費量は $C = 45$ F付近を境に(4)式による制御よりも削減されることが分かる。なお，EDLC蓄積エネルギーの最大値に対する，最大と最小値の差分の割合，すなわちEDLC蓄積エネルギーの利用効率を，制御方式ごとにFig. 10に示す。提案方式の方がEDLC蓄積エネルギーの利用率は最大で20%程度高く，そのためエンジン動作頻度が低減され，燃費削減に繋がったと考えられる。ただし，提案方式の場合は $C = 63$ F以下では V_c がTable 2に示した下限まで低下するなど，エンジンがMAXモードで動作する機会があるため，結局燃料消費量は1%程

Fig. 9. Relationship of EDLC capacitance and fuel consumption.

Fig. 10. EDLC energy availability.

(a) Engine behavior ($C = 51.7$ F, conventional control).

(b) Engine behavior ($C = 51.7$ F, proposed control).

Fig. 11. Comparison of the engine operations.

度の削減に留まり，利用率の差ほど燃料消費量の差はない結果となった。

〈4・4〉 エンジン動作に関する考察 前節の結果から，提案方式の場合，従来方式に比べて $C \geq 45$ Fの領域で燃料消費量は少ない。そこでこの理由を明らかにするため，各制御方式のエンジンの動作状況を調べる。Fig. 11は走行中のエンジン動作の様子を車両速度 v_t とともに示したものである。なお，エンジンモードに関しては縦軸のスケールに実際の出力を反映したものではなく，単純にモードの差を表す。従来方式の場合には，エンジンはOPTモードのみ動作している。しかし，提案方式の場合には， v_t が最高速度 $v_{tmax} = 70$ [km/h]まで上がる際，エンジンはMAXモードで動作していることが分かる。従来方式による電圧制御を行う場合には， V_{cref} に損失が見込まれているため，力行中にOPTモードでエンジンを長く動作させて，一連の

Fig. 12. Relationship of EDLC capacitance and FUEL consumption (No limit of the engine operation timing).

Fig. 13. EDLC voltage and its reference by the proposed control ($C = 51.7$ F, No limit of the engine operation timing).

走行で発生する損失に相当するエネルギーを供給する。一方で提案方式による電圧制御を行う場合には、 V_{ref} に損失が見込まれていないため、 v_{tmax} まで加速する際に EDLC 蓄積エネルギーが不足し、EDLC 電圧の下限リミットが動作して、MAX モードでエンジンが動作する。しかし、EDLC の蓄積エネルギーを最大限活用していることになるため、結果的には燃費削減に効果的であった。

〈4・5〉 力行中以外でのエンジン出力について 実際の運転では勾配や速度制限等、EDLC 電圧指令値設計には考慮していない負荷変動が発生する。これは損失の発生の仕方にも影響を与えるため、損失を考慮しない提案方式では、EDLC 電圧の指令値に対する追従性が低下する恐れがある。そこで本節では、電圧制御の実用上エンジン動作を力行・回生時にも許容することの必要性を鑑み、エンジン動作を力行時に限定しない場合について前節と同様のシミュレーションを行い、燃料消費量について検討する。EDLC 容量と燃料消費量の関係を Fig. 12 に示す。制御方式によらず、Fig. 9 で示した結果よりも全般的に燃料消費量は多くなった。Fig. 13 は $C = 51.7$ F で提案方式を用いた場合のシミュレーション結果である。この結果から、EDLC 電圧は指令値によく追従するが、そのためにエンジンの動作頻度が増え、燃費が悪化したことがわかる。

次に、Fig. 12 では、提案方式の場合に EDLC 容量によらず燃料消費量が大きく変動していることについて検討を行った。Fig. 14 は、提案方式を用いた電圧制御を行った場合に、ある駅間で回生ブレーキを行っている際の V_c と V_{ref} の時間推移、および、エンジン動作モードを示したグラフである。 $C = 44$ F の結果では 75 s 付近（力行時）や 105 s 付近（回生開始時）にエンジンが SIV モードのままだが、 $C =$

Fig. 14. EDLC voltage and engine behavior, Proposed control.

45 F の場合には OPT モードでエンジンが動作していることが分かる。この原因は、提案方式が損失を考慮しないシンプルなものであるため、EDLC 容量のわずかな違いが顕著に指令値に現れることに起因する。同じ負荷パターンを与えた時に、EDLC 容量が少し違うだけで電圧指令値の軌跡や電圧偏差の開き方の違いに大きく反映されてしまうため、Fig. 12 のようなばらつきが出ると考えられる。また、得られる回生エネルギーが同じでも EDLC 容量が大きいほうが電圧値として現れる変化分が小さいため、 $C \geq 45$ F では $\Delta V_c > 10$ V となり、エンジンが OPT モードで動作してしまう。なお、損失を考慮した従来方式では、エンジン動作のタイミングに依らずこの現象は発生しない。

〈4・6〉 負荷変動を考慮した検討 エンジンが常に動作できることのメリットは、負荷が急変した場合でも EDLC の電圧指令値に対して不足するエネルギー（電圧）を力行時に限らず供給できることである。その結果、勾配などの大きな負荷変動で EDLC 電圧が指令値に対して大きく低下しても電圧制御の追従性を保つことができるため、EDLC 蓄積エネルギーの不足分を補うためにエンジンが MAX モードで動作する頻度の低減が期待できる。そこで本節では、Fig. 15 に示すように、第 2 駅間に 1.2 km、第 5 駅間に 1.7 km の 10% の上り勾配を、第 3 駅間に 1.5 km、第 7 駅間に 1.6 km の 10% の下り勾配を想定したシミュレーションを行う。なお、車両の概略の位置情報は得られるものとし、下り勾配駅間では、EDLC の電圧偏差 ΔV_c が $\Delta V_c < -30.0$ V を満たした場合エンジンはアイドリングストップ状態とし、補助電源負荷への電力供給も EDLC から行う。但し、エンジンのアイドリングストップ中やそこからの再始動時の燃料消費は考慮しないものとする。以上によって下り勾配での回生失効の抑制を期する。

Fig. 15. Running pattern of train with grade.

Fig. 16. Relationship of EDLC capacitance and fuel consumption at the grade sections.

前記勾配区間でのシミュレーションによる、EDLC 容量と燃料消費量の関係を Fig. 16 に示す。エンジンが常に動作できる場合、力行時のみエンジンを動作させる場合よりも燃料消費量は大きい。一方、エンジン動作を力行時に限定した場合、制御方式で比較すると $C = 48\text{F}$ 付近を境に提案方式の方が燃費が小さくなる。ここで、 $C = 51.7\text{F}$ の場合でシミュレーションを行い、電圧制御とエンジンが常に動作することの負荷変動時に対する有効性を検討する。Fig. 17(a), (b) は、提案方式による電圧制御を行ったシミュレーション結果である。エンジン動作を力行時に限定した場合、第 2・第 5 駅間の上り勾配区間で EDLC 電圧が指令値に対し低下するが、エンジン動作を常に許容した場合は急激な負荷変動に対しても不足するエネルギーを随時供給し、上り勾配でも EDLC 電圧は指令値によく追従している。一方、下り勾配区間では、 $\Delta V_c < -30.0\text{V}$ でエンジンをアイドルリングストップ状態とすることで下り勾配区間での回生エネルギーを全て回収できている。この結果から $C = 51.7\text{F}$ の EDLC 容量は適切であると言える。なお、エンジン動作を力行時に限定した場合の燃料消費量は 7651g 、エンジン動作を常に許容した場合の燃料消費量は 7797g であった。

一方、従来方式による電圧制御を行った場合のシミュレーション結果を Fig. 17(c) に示す。下り勾配区間では回生電力を吸収できるが、平坦線区の場合と同様、エンジンの過剰なエネルギー供給により EDLC 電圧は駅停車時に指令値を上回ることがある。また、このときの燃料消費量は 7678g であった。

以上より、エンジンが力行時のみ動作する場合、上り勾配区間ではエンジン出力の供給が追いつかず EDLC 電圧は

(a) Limited engine operations during acceleration, Proposed control.

(b) No limit of the engine operation timing, Proposed control.

(c) Limited engine operations during acceleration, Conventional control.

Fig. 17. EDLC voltage ($C = 51.7\text{F}$).

指令値に対して大幅に低下するが、エンジンが常に動作する場合は EDLC 電圧が指令値に追従するように随時エンジン出力が供給される。しかし、エンジンを常に動作させて MAX モードの使用頻度を抑制してもエンジンの動作頻度自体が増してしまうため、燃料消費量の面では力行時のみのエンジン動作が有利であった。

5. まとめ

エンジン出力調整により EDLC 電圧を制御し、ハイブリッド電源鉄道車両のエネルギーマネジメント手法として、従来の予測的な損失の考慮を省略し、過剰なエンジン動作を抑制できるシンプルな EDLC 電圧指令値生成法を提案した。その有効性を数値シミュレーションにより、主に EDLC 容量と燃料消費量の関係で評価を行なった。

その結果、今回提案した方式にて平坦な線区を走行する場合、すなわち負荷変動の少ない場合については、エンジン動作を力行時に限定することと併せて EDLC 蓄積エネルギーを大きな充放電深度で使用して極力エンジン動作時間を低減することで、 $C \geq 45\text{F}$ の領域で燃料消費の改善効果が得られることがわかった。 $C < 45\text{F}$ の領域では EDLC 容量のわずかな違いで燃料消費量の差が大きい一方、 $C \geq 45\text{F}$ の領域ではほとんど燃料消費量の差がなくなることから、搭載する EDLC 容量は $C \geq 45\text{F}$ で決定すべきであり、し

たがって本検討の提案方式には有用性が認められたと言える。またエンジン動作を力行時以外でも許容する場合、平坦線区では全般的に燃料消費量は多い結果となった。

また、実際の運転では、勾配や臨時速度制限等、EDLC 電圧指令値生成の上で考慮していない負荷パターンが生じる。そこで、エンジン動作を力行時に限定せず、だ行時や回生時にも許容し、EDLC 電圧が指令値に追従し易くする方法を用いて、勾配による大きな負荷変動が生じた場合に検討を行った。その結果、エンジン動作頻度の増加による燃費悪化が MAX モード動作頻度の低減による燃費改善効果を相殺し、燃費改善の効果は薄いことがわかった。ただし、指令値に対する EDLC 電圧の追従性は増すため、運転中に予期できない大きな負荷変動が起きる場合に備えるという意味では価値があると言える。

このように、ハイブリッド電源車両のエネルギーマネジメントの問題は、負荷変動の頻度とその深さに対して、適切なエネルギーストレージデバイス容量と電源出力の関係を如何に最適化するかという問題に帰着できることがわかる。

文 献

- (1) N. Shiraki and T. Shinomiya, et al.: "Improvement in main circuit redundancy of hybrid vehicle K1HA E200", The 2007 Tokyo Local Seminar I.E.E. Japan, B-11 (2007-11) (in Japanese)
白木直樹・四之宮武，他：「キハ E200 型ハイブリッドディーゼル車の改良」，電気学会東京支部講習会テキスト，B-11 (2007-11)
- (2) H. Ihara, H. Kakinuma, I. Sato, T. Inaba, K. Anada, M. Moromoto, T. Oda, S. Kobayashi, T. Ono, and R. Karasawa: "Development of Motor-Assisted Hybrid Traction System", Record of World Congress of Railway Research (WCRR) 2006, (2008-5)
- (3) JR-Freight Press release: "Design and type of a newly developed shunting locomotive" (in Japanese)
JR 貨物プレスリリース：「新型入換専用機関車（試作）の形式名とデザインについて」，
www.jrfreight.co.jp/common/pdf/news/201002-02.pdf
- (4) B. Destraz, P. Barrade, and A. Rufer: "Power Assistance for Diesel-Electric Locomotive with Supercapacitive Energy Storage", Proceedings of 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany (PESC'04), (CD-ROM), pp.677-682 (2004-6)
- (5) H. Shibuya, K. Matsuo, and K. Kondo: "A Basic Study on Control Strategy of Hybrid Powered Railway Vehicles with EDLC", The Eleventh IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, Zurich, Switzerland (2008)
- (6) M. Ogasa, et al.: "Runing Test results view of a contact-wire and on-board battery hybrid LRV(contact-wire-less LRV) in an existed tram line", Proceedings of JIASC 2008 (CD-ROM), No.3-18, pp.III-187-190 (2008-8) (in Japanese)
小笠正道，他：「架線ハイブリッド LRV（架線レス LRV）の軌道線走行試験結果概要」，平成 20 年電気学会産業応用部門大会講演論文

集 (CD-ROM), No.3-18, pp.III-187-190 (2008-8)

- (7) H. Nomoto, K. Yoshida, and S. Takda: "Development of the Battery traction vehicle", JREA, Vo.53, No.5, pp.35069-35072 (2010-5) (in Japanese)
野元 浩・吉田耕治・竹田進治：「蓄電池駆動電車システムの開発」，JREA, Vo.53, No.5, pp.35069-35072 (2010-5)
- (8) Y. Sekijima and S. Toda: "Test run of onboard energy storage system using EDLC" Proceedings of JIASC 2008 (CD-ROM), No.3-21, pp.III-201-202 (2008-8) (in Japanese)
関島康直・戸田伸一：「車両用 EDLC 電力貯蔵システムの走行試験」，平成 20 年電気学会産業応用部門大会講演論文集 (CD-ROM), No.3-21, pp.III-201-204 (2008-8)
- (9) B. Destraz, P. Barrade, and A. Rufer: "Power Assistance for Diesel-Electric Locomotive with Supercapacitive Energy Storage", Proceedings of 2004, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany (PESC'04), pp.677-682 (2004-6)
- (10) H. Shibuya and K. Kondo: "Designing methods of Capacitance and Control System for a Diesel Engine and EDLCs Hybrid Powered Railway Traction System", IEEE Trans. on IE (accepted in Oct. 2010)

岡 野 翔 太（学生員） 1987 年 10 月 26 日生。2010 年 3 月，千葉大学工学部電子機械工学科卒業。同年 4 月千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻電気電子系コース博士（前期）課程入学。現在同 2 年生。EDLC ハイブリッド電源鉄道車両の研究に従事。

澁 谷 浩 之（正員） 1985 年 11 月 11 日生。2010 年 3 月，千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻電気電子系コース博士（前期）課程修了。在学中は，EDLC ハイブリッド電源鉄道車両の研究に従事。

近 藤 圭 一 郎（上級会員） 1968 年 11 月 10 日生。1991 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業，同年 4 月，（財）鉄道総合技術研究所入所。2007 年 1 月千葉大学工学部助教授，同年 4 月同准教授，現在に至る。パワーエレクトロニクス・電動機制御とその鉄道応用の研究に従事。博士（工学）。技術士（機械部門・総合技術監理部門）。