

電圧変動を考慮した EDLC-インバータ直結型電気自動車の制御法

河島 清貴*, 内田 利之, 堀 洋一 (東京大学)

A Novel EDLC Direct Connected Inverter Control for Electric Vehicle
Taking into Consideration of Voltage Variation

Kiyotaka Kawashima*, Toshiyuki Uchida, Yoichi Horii (University of Tokyo)

Abstract

In this paper, a novel inverter control, which is directly connected with electric double layer capacitor (EDLC), for electric vehicle is proposed. In general, DC-DC converter is used to compensate EDLC's voltage variation. It is shown that the inverter, which is specially designed to take into consideration of voltage variation, operates without any problem between 100V - 30V and acceleration performance is maintained by applying d axis current control in whole voltage range on interior permanent magnet synchronous motor.

キーワード：電気自動車, 埋込磁石同期モータ, 弱め界磁制御, 電気二重層キャパシタ

(Electric vehicle, interior permanent magnet synchronous motor, flux weakening control, electric double layer capacitor)

1. はじめに

1.1 研究の背景 異常気象が世界的に深刻な問題となる中で、排気ガスを全く出さない電気自動車 (EV) の果たす役割は非常に大きくなってきている。電気モータで走ることの効率の良さは電車で実証済みであり、今後自動車が電気車で走る時代はすぐそこまで来ている。

その中で蓄電装置の発展は目覚ましいものがあり、自動車メーカーと提携をした複数の電池メーカーが Li イオン電池量産に踏み切っている。しかし安全性の問題は数年前に比べ落ち着いたものの当電池が潜在的に抱える問題であり、出力/エネルギー密度も理論的な上限が存在する。また燃料電池 (FC) も非白金触媒開発など着実に進んでいるものの、車体の価格やインフラなどの問題を考えると本格普及は 30 年程度かかると見られている。

そこで新しいデバイスとして近年注目されているのが物理電池である電気二重層キャパシタ (EDLC) である。EDLC はエネルギー密度はまだ低いものの、化学反応を伴わないため大電流で瞬時に充電でき、繰り返しの充放電寿命も電池に比べ非常に長い。これを単体の蓄電装置として用いたり、電池やエンジンとのハイブリッドシステムとして用いたり適用例が数多く報告されている。次節ではその中でも車両への応用例を取り上げる。

1.2 キャパシタの車両への応用技術 上海では、EDLC のみをエネルギー源として用いた純 EDLC バスが実際に運行を始めている⁽¹⁾。このバスは、各停留所で車両上部に搭載したパンタグラフのようなアームを伸ばして 1,2 分ほど充電を行なう。停留所間隔は 500m であるので、この距離が走れる分だけの充電をすればよい。また EDLC とは構造は違うが、カナダの EV メーカーがセラミックキャパシタを用いて 5 分の充電で 800km 走行可能な EV を開発したと発表している^{(2) (3)}。

国内でも工場内の自動搬送車 (AGV) や瞬発的な力を要求されるフォークリフトやショベルカーなどへの EDLC が採用



(a) 上海の純 EDLC バス
(a)EDLC bus@Shanghai



(b) セラミックキャパシタ EV
(b)Ceramic capacitor EV@Canada

図 1 自動車におけるキャパシタ応用例
Fig. 1. Capacitor applications on vehicles

されている。このように比較的限られた空間で、少量のエネルギーを持ちながら充電を繰り返すという新しい交通/運送システムが注目されている。エンジン自動車を単純に代替する意味での EV は多くのエネルギーを抱えながら走るものであり、充電時間の面から見て効率が悪く、電池寿命も大きな問題である。将来充電スタンド等のインフラも発達することから、今のうちに EDLC を主蓄電装置とした新しい交通システムの議論を行うことは重要な意義を持っている。

一方で上海の EDLC バスの例では、全体の 1 割程度という限られた電圧範囲しか使っていない。キャパシタのエネルギーは電圧の二乗に比例することから、これではキャパシタ内に蓄えられているエネルギーを 2 割しか使っていないことになり、EDLC の長所も生かせないし運用効率も極めて低い。本研究では特別に設計したインバータと EDLC を直付けし、100V から 30V を使うことで 9 割以上のエネルギーの利用を実現している。

2. 電気二重層キャパシタの特性

2.1 EDLC の構造 電気二重層 (EDL:Electric Double Layer) の現象は 1879 年 Helmholtz によって発見された。EDL の意味は電解液が導体電極に接する領域に薄い分子の層ができ、その外側にできる拡散層のことを総称したものであ

る⁽⁴⁾。図2にその構成を示す。本EDLCは電解液にイオン性液体を用いており、内部抵抗が非常に小さくマイナス30の低温環境下でも劣化せずに使用可能である。

2.2 EDLCの利点 EDLCは以下のような利点を持っている。

- ・ 化学反応を伴わず大電流での充放電が可能である
- ・ 電池に比べ1000倍以上繰返し充放電が可能である
- ・ 電圧から容易にエネルギー残存量が分かる
- ・ 重金属を用いないため環境にやさしい

2.3 等価回路 EDLCの等価回路は、直列等価抵抗及び並列自己放電抵抗の他に、RCラダー構造をしているため次のような現象が起こる。

- キャパシタ静電容量が高電圧になるに従って増加する現象
- 満充電にしたはずなのに自己放電率以上に著しく電圧が低下する現象 (RC後段への緩和充電)
- 放電したはずの電圧が、時間が経つと回復したりする現象 (RC後段からの放電)

これらは特に大きな問題ではないものの、使用時には注意が必要である。特に3番目の特徴は電圧として外に表れていてもエネルギー量は非常に小さく使いものにならない可能性があるからである。

3. EDLC-インバータ直結型電気自動車の開発

我々の研究グループでは、EDLCの急速充電という利点に注目し、蓄電装置としてEDLCのみを用いた小型EV”Capacitor-COMS”を2005年に開発した⁽⁵⁾。

車両開発の目的は、EVにおける車体運動制御の実験を行うためである。従来のEVは充電に半日もかかることから、実験を一日に1時間程度しか行なえないなど利用効率に大きな問題があった。”C-COMS”ならばパラメータを変更する間に充電が終わるため、同じ条件で繰り返し実験が行なえ利用効率が飛躍的に向上した。

3.1 主要諸元 図3に実験車両”C-COMS”を示し、表1に実験車両の諸元を、表2に搭載しているEDLC諸元を示す。実験車両は後左右二輪独立駆動で二つのインバータを搭載している。

3.2 走行実験結果 図4にトラック状のコースを周回した際のEDLCの電圧、電流変化を示す。本実験では100V

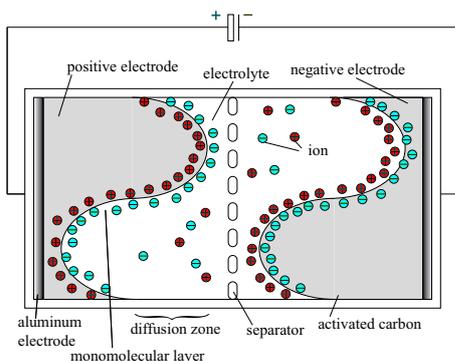


図2 EDLCセルの構造
Fig. 2. EDLC cell structure

Capacitor COMS1

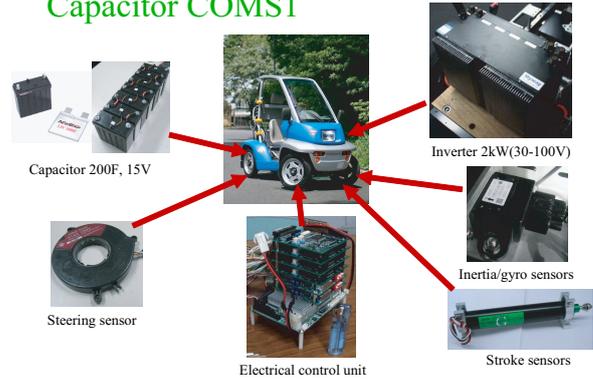


図3 車両運動統合制御実験車両”C-COMS”
Fig. 3. Experimental vehicle for electric stability program

表1 ”C-COMS”の主要諸元
Table 1. Specification of ”C-COMS”

Category	1 passenger vehicle
Drive	2 in-wheel motors(RR)
Motor(Rated/Max power)	IPMSM(0.3/2kw)
Max torque / Velocity	100Nm / 50km/h
Inveter	PWM vec.(MOSFET)

表2 搭載しているEDLCの諸元表
Table 2. Specification of energy storage device

Device	EDLC(3P7S)
Voltage / Capacitance	100V / 86F
Energy	131Wh
Charging time	30sec(150A)
Distance / Time	4-6km / 20min.
Energy / Power density	3.3Wh/kg / 7.1kW/kg

から30Vまで使用しているが、EDLCのエネルギーは電圧の二乗で効くことから91%のエネルギーを使用したことになる。図4から、電圧範囲を制限するためEDLCの電圧が高い場合は回生をあまり行っていないことが分かる。また低電圧となっていくに従って電流分が増加していることから、インバータの電流制御が、電圧の低下分を電流で補償していることがわかる。

3.3 EDLC-インバータ直結型の利点と注意点 ここでDC/DCコンバータを車載するか車外に置くか特徴を比較する。利点としては、DC-DCコンバータによる損失がなく

表3 DC/DCコンバータ車載型と車外型の特徴
Table 3. Comparison of DC/DC converter disposition

	効率	空間利用	回生	運転領域	非接触給電
車載型					可
車外型					不可

なり、スペースの確保もできる。また前述のようにインバータの電流制御が電圧降下分を補うので、電圧変動も問題はないことなどが挙げられる。一方で電圧が降下するため運転領

域が縮小してくる他、高周波交流を用いる非接触給電との組み合わせは難しい。

使用上の注意点として、加速性能は電圧に比例、エネルギーは二乗で効いてくるので、できるだけ高い電圧で使用する必要がある。例えば、15V モジュールが二つあれば、総エネルギーは並列で使っても直列で使っても同じだが、加速性能について考えた場合直列接続した方がよい。しかし蓄電装置の高電圧化にはスイッチング素子と直流電解コンデンサ耐圧を考慮しなければならず、モータやインバータの体格考慮及び寿命や温度管理が重要となる。

高い電圧に保つためにバンク切替も考えられるが、チャタリングや体積や重量の増加といった問題をカバーするだけのエネルギーを切替後に取り出せないため自動車応用ではあまり実用的ではないと考えられる。

EDLC-インバータ直結型 EV の場合、運転領域縮小に対する対策としてまとめると以下の二つが考えられる。

- EDLC をできるだけ高い電圧で使う。
- 全電圧範囲にわたる d 軸電流制御によって高効率運転及び広い運転領域を確保する。

次章では、弱め磁束制御による運転領域の拡大及び高電圧化による運転領域の拡大について示す。

4. d 軸電流制御による運転領域の拡大

一般的に加速性能は電圧に比例する。EDLC-インバータ直結型の場合、EDLC の電圧が下がってくると加速性能は低下する。しかし以下で提案するように、高電圧時には鉄損を考慮した最大効率制御で、低電圧時には最大出力制御を行うことで、速度トルクカーブにおける運転領域の減少を抑えることができる。

モータの種類や用途に応じて以下に示すような種々の制御方式が提案されている。

- 電圧情報不要 ($i_d = 0$ 制御, 最大トルク (電流制御), 最大効率制御⁽⁶⁾, 力率 1 制御, 過変調制御)
 - 電圧情報必要 (最大トルク (磁束制御), 弱め界磁制御)
- 本章ではまず IPMSM の基本方程式について述べ、最大出力制御について説明する。

4.1 IPMSM のベクトル制御法 静止座標系からロータに乗った回転座標系での dq 変換を行うと、IPMSM

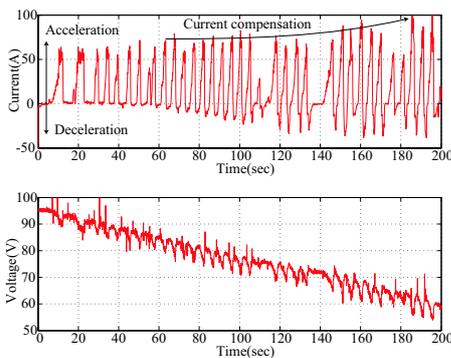


図 4 走行実験による一次側電圧電流の変化

Fig. 4. Voltage and current transition of driving experiment

の電圧方程式は次式となる⁽⁷⁾。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -wL_q \\ wL_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ w\Phi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

またトルク式は以下のようになる。

$$T = P \left(\Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (2)$$

$$= P \left(\Psi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \sin\beta \right) \quad (3)$$

ここで $\Phi_a = \sqrt{\frac{3}{2}} \Phi_f$

Φ_e : 永久磁石による電機子鎖交磁束の実効値

v_d, v_q : 電機子電圧の dq 軸成分

i_d, i_q : 電機子電流の dq 軸成分

L_d, L_q : 電機子の dq 軸インダクタンス

w : 電気角速度, P : 極対数である。

d 軸に電流を流すことは二つの目的がある。リラクタンストルクを利用しトルクアップする、及び界磁分を減らし高速域まで回すことである。電流/電圧制限の式は以下のようになる。

$$i_d^2 + i_q^2 < I_{am}^2 \quad (4)$$

$$(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \Psi_a)^2 < \left(\frac{V_{am} - R_a I_{am}}{w} \right)^2 \quad (5)$$

ただし、 I_{am} は電機子電流の最大値、 V_{am} はインバータが出力できる最大の電圧値である。

4.2 最大出力制御 電流及び電圧の制限を考慮して、モータの出力範囲を最大にするために、低速域で最大トルク (MT:Maximum torque) 制御、高速域で弱め界磁 (FW:Field weakening) 制御とを組み合わせた最大出力 (MOP:Maximum output power) 制御が用いられることが多い。

通常インバータから見て一次側電圧 V_{dc} 一定の場合、トルク垂下が起こる速度 w_c も一定となる。しかし、本論文で提案しているインバータ-EDLC 直結の場合は、この w_c も変動するため V_{dc} (V_{am} に相当) に応じて変化させなければならない。式 (5) より、 w_c は次式のように V_{am} の一次式で表されることがわかる。

$$w_c = \frac{1}{\sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \Psi_a)^2}} V_{am} - \frac{R_a I_a}{\sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \Psi_a)^2}} \quad (6)$$

図 5 に式 (6) に基づいた MT 制御と FW 制御の切り替えマップを示す。このように運転モードを速度と電圧に基づいて切り替えることで低電圧時も高速域まで使うことが可能となる。

- 最大トルク (MT) 制御

式 (3) を β で微分すると、 I_a が与えられた際に最大トルクを出力する β が得られる。これを i_d として書き直すと、

$$i_{d1} = \frac{\Psi_a}{4(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\Psi_a^2}{16(L_d - L_q)^2} + \frac{1}{2} I_a^2} \quad (7)$$

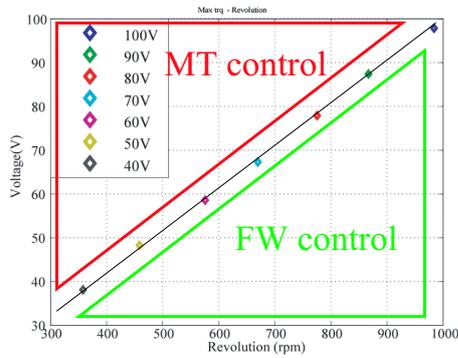


図 5 MT 制御と FW 制御の切り替えマップ
Fig. 5. Switch map of MT cont. and FW cont.

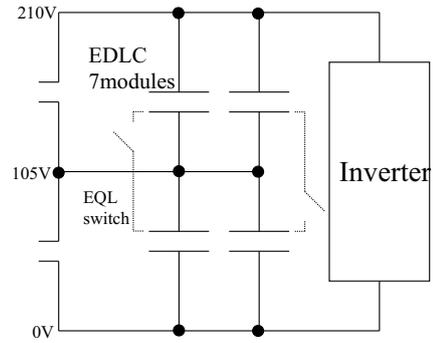


図 7 中間電位引き出しによる充電
Fig. 7. 200V EDLC system

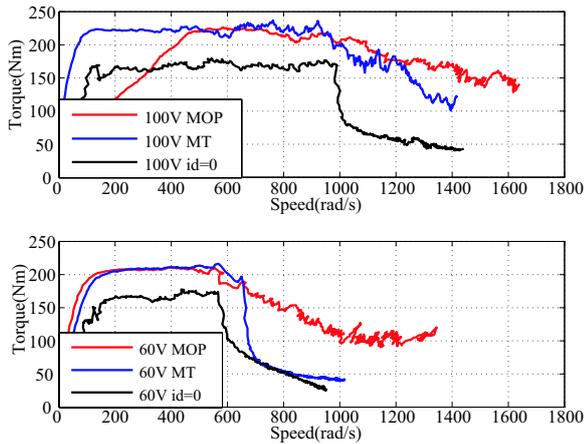


図 6 速度-トルク特性の比較
Fig. 6. Comparison of velocity-torque characteristic

$$i_{q1} = \sqrt{I_a^2 - i_d^2} \quad (8)$$

・弱め界磁 (FW) 制御

FW 制御の場合は式 (4) と式 (5) より i_d は以下のように求められる。

$$i_{d2} = \frac{\Psi_a L_d - \sqrt{(\Psi_a L_d)^2 + (L_q^2 - L_d^2)((L_q I_{am})^2 - (\frac{V_{am} - R_a I_{am}}{w})^2)}}{L_q^2 - L_d^2} \quad (9)$$

$$i_{q2} = \sqrt{I_a^2 - i_{d2}^2} \quad (10)$$

図 6 に MOP 制御, MT 制御のみ, $i_d=0$ 制御を適用した場合の比較を, 100V と 60V で行っている。MOP 制御によって運転領域の縮小を抑えられていることが分かる。

5. 昇圧による運転領域の拡大

現状の蓄電装置システムの容量は 15V, 200F モジュール 21 個を 3 並列 7 直列とした 105V, 87F であった。これにさらに 7 モジュールを加え, 2 並列 2 直列化することによって, 210V, 29F とする予定である。現状では充電器が 100V 対応であるため, 図 7 のように 105V 電位で中間点を作り, そこと 0V 電位及び 210V 電位点で充電を行うものとする。充電の際は大きな電圧差が生まれるため 105-210V 郡最低電圧モジュールの均等化回路 (EQL)-端子と 0-105V 最大電圧モジュールの

EQL+端子の均等化回路接続はしていない。この改修によって, エネルギーは 3 割増加, 加速性能も大幅に向上する予定である。

6. おわりに

本論文では,

- 二次電池は持っていない EDLC の利点を示した。
- EDLC の電圧 100V から 30V で駆動することで EDLC のエネルギーの約 90 % を使用できることを示した。
- 電圧変動してもインバータの電流制御が補うためモータ駆動にも問題はないことを示した。
- DC-DC コンバータ車載型と車外型の比較をし, EDLC-インバータ直結型 EV の特徴を明確にした。
- 全電圧領域で弱め界磁制御を行うことで, 低電圧でも広い運転領域を確保した。

7. 謝 辞

筆者とこの実験成果は独立行政法人日本学術振興会によって援助を受けております。また実験車両に搭載の電気二重層キャパシタについて日清紡株式会社様にはお世話になり大変感謝しております。

参考文献

- (1) 森五宏, "スーパーキャパシタトローパス", 第 25 回 ECaSS フォーラム, 2007.06
- (2) 村上善則, "移動体エネルギーストレージ技術の別の可能性について", 電気学会第 7 回エネルギーストレージ技術調査専門委員会, 2007.12
- (3) Weir, Richard Dean, et. al, "Electrical-energy-storage unit (EESU) utilizing ceramic and integrated-circuit technologies for replacement of electrochemical batteries", US patent, # 7,033,406
- (4) 岡村迪夫, "電気二重層キャパシタと蓄電システム 第三版", 日刊工業新聞, pp.25, 2005.09
- (5) 飯塚昭三, "燃料電池車・電気自動車の可能性", グランプリ出版, pp.202-203, 2006.06
- (6) Shigeo Morimoto et. al, "Maximum Efficiency Control for Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE IECON'91, pp.283-288, 1991.11
- (7) 武田洋次他, "埋込磁石同期モータの設計と制御" オーム社, pp.16-50, 2001.10