

# 電気二重層キャパシタを用いた誘導電動機回生電力蓄電装置

学生員 加藤 康平\* 正員 辻 俊明 正員 阿部 茂 (埼玉大学)

## Regenerative Energy Storage System for an Induction Motor using Electric Double Layer Capacitors

Kohei Kato\*, Student Member, Toshiaki Tsuji, Member, Shigeru Abe, Member (Saitama University)

The authors have studied a technique for accumulating regenerative energy from an elevator with Electric Double Layer Capacitor (EDLC). Existing energy storage systems for elevators use Nickel-metal hydride batteries, however, their lifetime is shorter than EDLC. Hence, EDLC is introduced in the proposed storage system. An energy storage system with EDLC needs more consideration about control and motor efficiency since its terminal voltage varies with charge and discharge. An experimental system is developed with an induction motor and flywheel. The system is a 1/10 inertia model of EDLC accumulation elevator. Its performance is verified with experiment.

キーワード：電気二重層キャパシタ，誘導電動機，エレベータ，回生電力

**Keywords** : Electric Double Layer Capacitor, Induction Motor, Elevator, Regenerative Energy

### 1. まえがき

電気二重層キャパシタ (EDLC) は、寿命が 10 年以上と長く、出力密度も二次電池より一桁高い<sup>(1)</sup>という特長をもっている。この特長を生かし、瞬低補償装置や上海のトロリーバスの蓄電装置などに用いられている。

我々は EDLC をエレベータに用い、蓄電装置の長寿命化と省エネ率の向上を図る EDLC 蓄電式エレベータを研究している。モータの電力回生時に EDLC に充電し、力行時に再利用する。EDLC は整流器とインバータ間の直流部に直結し、充放電による EDLC の電圧変化を利用して交流電源と EDLC 電源を切り替える方式である。これまでにシミュレータを構築して EDLC 充放電効率<sup>(2)</sup>やエレベータ省エネ率<sup>(3)</sup>を算出し、その可能性を確認してきた。今回、小型のエレベータ模擬装置 (1/10 モデル) を用いた実験を行い、シミュレータによる検討に問題がないかを検証した。

最近のエレベータは永久磁石同期電動機のベクトル制御が一般的であるが、実験では簡単のため誘導電動機のすべり周波数制御を用いた。実験の結果、以下の点が明らかになった。(1) 直流部すなわち EDLC の電圧が充放電によって大きく変化しても、モータの速度フィードバック制御が有効に働き、モータ回転数は目標値に追従する。(2) シミュレータではモータとインバータの効率をそれぞれ 95% で一定と仮定していたが<sup>(3)</sup>、実験では誘導電動機が小形のためか、回転数が低い時のモータ効率が悪い。(3) すべり周波数制御の制御方式により、回生電力すなわち EDLC 電圧変化が大きく変わる。

以下、2 章で電気二重層キャパシタ蓄電式エレベータの構成とエレベータのモデル化、3 章で回転数制御方式、4 章で電解コンデンサに蓄電した場合の実験結果と結果の検討およびインバータ + モータ効率の検証、5 章で EDLC に蓄電した場合の実験結果、6 章で結論を述べる。

### 2. 電気二重層キャパシタ蓄電式エレベータ

2.1 EDLC と二次電池の比較 二次電池と比較した EDLC の長所は、寿命が 10 年以上と長く出力密度が高いことである。現在、二次電池はリチウムイオン電池が主流となりつつあるが、これは故障時に発火の恐れがありエレベータには適さない。ニッケル水素電池を用いた省エネエレベータは実用化されているが、省エネ率が 20 ~ 31% と低く<sup>(4)</sup>電池寿命もあるため普及していない。EDLC を用いれば、省エネ率の向上、蓄電装置の長寿命化・保守の低減が期待できる。

2.2 EDLC 蓄電式エレベータのシステム構成 電気二重層キャパシタ蓄電式エレベータのシステム構成を図 1 に示す。EDLC を直流部に直結するため、EDLC の充放電によって直流電圧  $V_d$  が変化する。エレベータのかごと釣り合いおもりはロープで結ばれ、かごに定員の 1/2 の乗客が乗車した際に釣り合いおもりとかごがバランスする。

2.3 エレベータの 1/10 モデル 表 1 に示す住宅用エレベータ (9 人乗り、速度 90m/min) の 1/10 モデルを、フライホイール付きモータで模擬した。エレベータの運転を正確に模擬するには、かごと釣り合いおもりの重量アンバランスによるトルクを再現するためにもう一つモータが必

表1 エレベータの仕様

階数 - 1 $N$	6	階間距離 $FD$	3.5m	定格速度 $v$	1.5m/s
加速度 $a$	0.55m/s <sup>2</sup>	定員 $n$	9	かご重量 $M_C$	600kg
定員乗車時の乗客重量 $M_P$	600kg	おもり重量 $M_{CW}$	900kg	機械系の効率 $\eta$	0.80

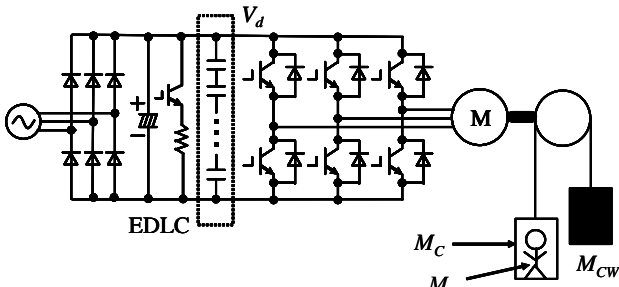


図1 EDLC蓄電式エレベータ

要となる。今回は簡単のため、乗客数が定員の1/2で常に一定であると仮定し、重量アンバランスがないとする。実機の重量1/10モデルは、かご重量  $M_C=60$ [kg]、乗客重量  $M_P=30$ [kg]、釣り合いおもり重量  $M_{CW}=90$ [kg]となる。これらの運動エネルギー  $E_S$  は次式で表される。

$$E_S = \frac{1}{2}(M_C + M_P + M_{CW})v^2 = 202.5 \text{ [J]} \dots\dots\dots (1)$$

フライホイールとモータの慣性モーメントを  $J$ 、フライホイールの回転角速度を  $\omega$  とすると回転エネルギー  $E_F$  は

$$E_F = \frac{1}{2}J\omega^2 \dots\dots\dots (2)$$

となる。 $E_S$  と  $E_F$  が等しくなるようにエレベータ模擬実験装置を設計した。実験装置は  $J=0.0497$ [kg $\cdot$ m<sup>2</sup>]のフライホイールとモータを用い、定格角速度を  $\omega=90.3$ [rad/s]=862[rpm]とした。エレベータの速度パターンを図2に、それに対応した実験装置の回転数を図3に示す。

### 3. フライホイールの回転数制御

2.2 で述べたように、EDLC蓄電式エレベータではEDLCの充放電によって直流電圧が変化する。電圧が変化しても回転数が図3の目標回転数になるようにフィードバック制御を行う必要がある。今回は図4に示すすべり周波数制御により回転数を制御した。図4中の  $V^*$  は電圧指令値である。 $f^*$ [Hz]は周波数指令値で、負の値は考えない。すべり周波数制御は演算が簡単で8ビットマイコン(H8)1個で計算できる。また同じマイコンで  $V^*$  と  $f^*$  から三相PWMインバータのゲート駆動信号を発生する処理も行っている。図4の点線内がマイコンのプログラム部分である。

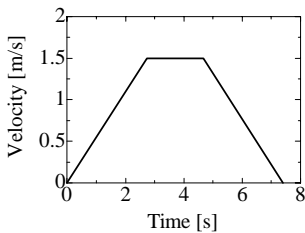


図2 エレベータ速度

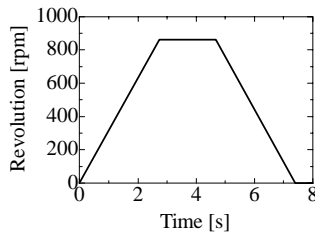


図3 フライホイール回転数

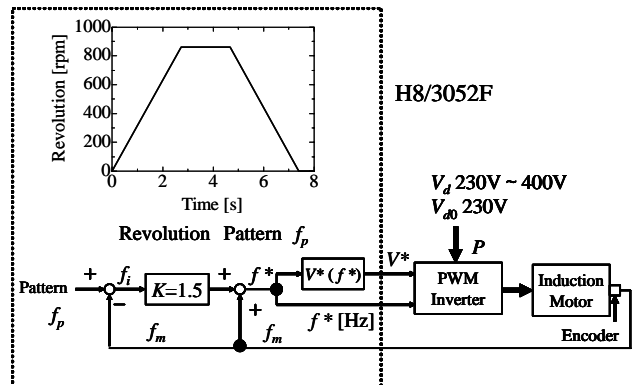


図4 回転数制御方式

## 4. 電解コンデンサ蓄電実験結果

4.1 電圧変化時のインバータ動作 電圧上昇幅を大きくするためにEDLCより容量の小さい電解コンデンサでまず実験した。回路を図5に示す。図3の回転数を目標値として図4の制御系で回転数を制御したときの実験結果を図6に示す。フライホイール減速時に再生電力により直流電圧  $V_d$  が最低電圧  $V_{d0}$  から上昇する。速度フィードバックにより、直流電圧が上昇してもインバータのPWM制御が適応して回転数が目標値に追従している。電解コンデンサに蓄積された再生エネルギーは最大32Jである。回転エネルギー203Jの16%に相当する。回転エネルギーに比べて再生エネルギーが小さい理由を次節で考察し、対策を検討する。

### 4.2 電圧指令値と再生電力

4.1の実験では図4中の  $V^*(f^*)$  関数を次の  $V/f$  パターン1とした。 $V^*(f^*)$  関数はPWM信号波(正弦波)の振幅に相当する電圧指令値である。信号波を振幅1の三角波と比較してPWM信号を作成する。

#### (1) $V/f$ パターン1

$$V^*(f^*) = \frac{f^* + 17}{50}, \text{ ただし } f^* > 31.9 \text{ のときは } f^* = 31.9$$

パターン1は、いわゆる  $V/f$  一定とする電圧指令値である。 $V^*(f^*)$  を上記のパターン1とした場合の実験結果が図6である。図6の指令回転数から周波数を計算し、 $V^*(f^*)$  を描くと図7の破線、 $V/f$  パターン1に示す台形となる。

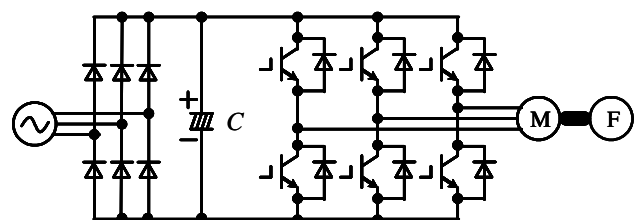


図5 実験回路

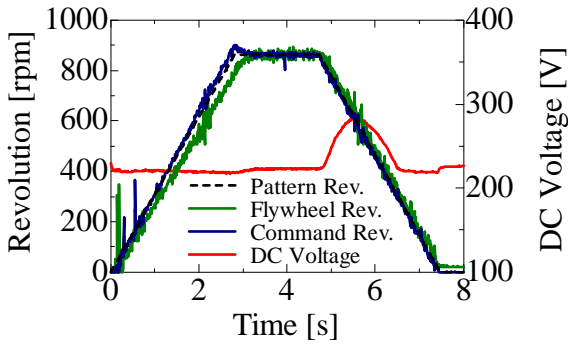


図6 回転数と直流電圧変化 (V/f パターン 1)

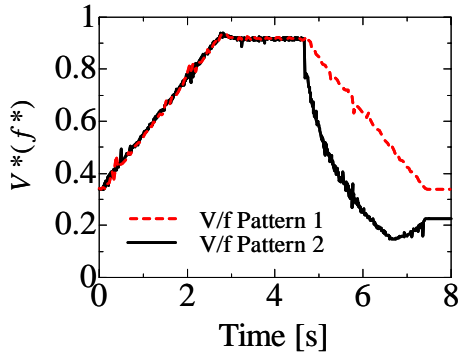


図7 V/f パターン

電圧指令値と周波数の比を一定とする V/f パターン 1 では、4・1 に示したように回生エネルギーが回転エネルギーの 16%と少ない。電圧指令値と周波数の比を一定としても、回生電力により直流電圧が上昇するためモータの端子電圧と周波数の比は一定とならない。直流電圧を検出してフィードバックする手法もあるが、本論文ではフィードバックを省き電圧指令値を変えてモータ端子電圧と周波数の比をほぼ一定とする手法を採用する。電圧指令値を以下の V/f パターン 2 とする。

(2) V/f パターン 2

$$V^*(f^*) = \frac{f^* + A}{B} \dots\dots\dots (3)$$

A, B は以下のようにとる。いずれも  $V^*(f^*) < 1$  である。

- ・ 加速～定速走行時  
 $A = 17$  , ただし  $f^* > 31.9$  のときは  $f^* = 31.9$   
 $B = 50$
- ・ 減速時  $f^* > 7.5$   
 $A = 10$  , ただし  $f^* > 38.9$  のときは  $f^* = 38.9$   
 $B = 145 - \frac{10f^*}{3}$  , ただし  $B < 50$  のときは  $B = 50$
- ・ 停止時  $f^* = 7.5$   
 $A = 10$   
 $B = 44 + 10f^*$

回生電力で電圧が上昇するのは減速時のみであるため、加速と定速走行の際は  $V^*(f^*)$  をパターン 1 と同じとする。停止時はトルクを大きくしてフライホイールを停止させるために  $V^*(f^*)$  の値を大きくする必要がある。

電圧指令値を上記のようにとると、 $V^*(f^*)$ 関数は図7の V/f パターン 2 となる。この場合の実験結果を図8に示す。電解コンデンサに蓄積された回生エネルギーは最大 73J である。回転数は目標回転数に追従し、回生エネルギーはパターン 1 の場合の 2.3 倍となった。

4・3 シミュレーションによる検討 前節において、直流電圧  $V_d$  が変化しても回転数フィードバックにより実際の回転数が目標回転数に追従することを示した。回生時のモータへの機械的入力  $V/f$  パターンによらず同じであるが、パターン 1 と 2 で回生エネルギーが大きく変わった。

この原因を調べるため回路シミュレータ PSIM で解析を行った。インバータ出力電流を図9に示す。図9(a)は V/f パターン 1 の場合の電流、(b)はパターン 2 の場合の電流であ

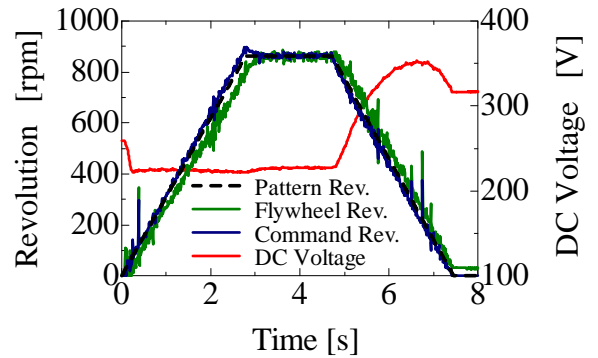
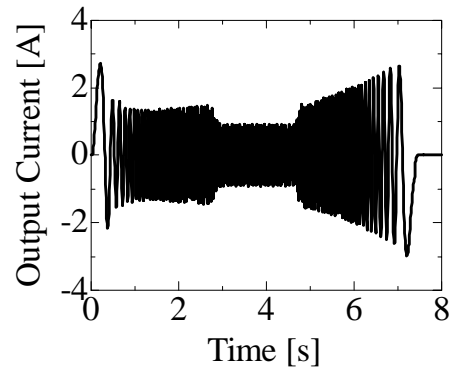
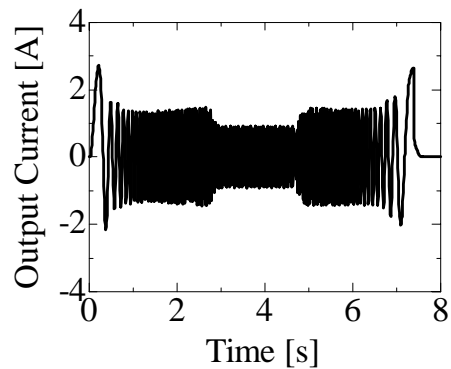


図8 回転数と直流電圧変化 (V/f パターン 2)



(a) V/f パターン 1



(b) V/f パターン 2

図9 インバータ出力電流 (シミュレーション値)

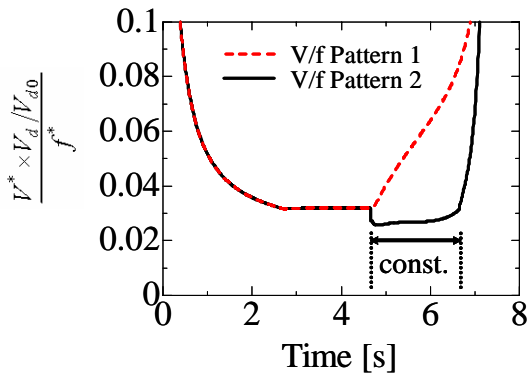


図10 端子電圧の上昇割合と周波数の比

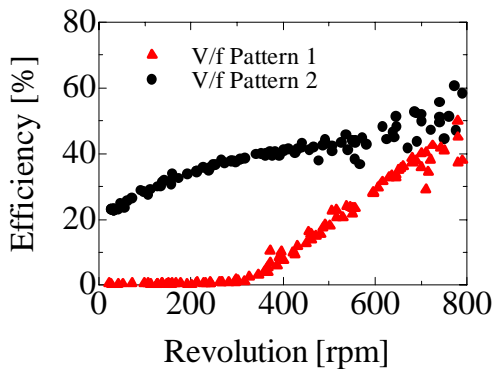


図11 インバータ+モータの効率(回生時)

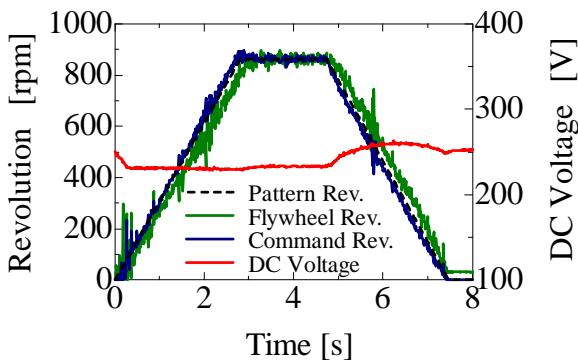


図12 回転数と直流電圧変化(EDLC蓄電時)

る。力行時の電流は両パターンとも同じ値であるが、回生時の電流はパターン2の方が小さい。電圧指令値  $V^*$  を下げることで電流が小さくなった。このためモータの銅損が減少し、回生電力が増加したと考えられる。

2種類の  $V/f$  パターンについて、シミュレーションにおける「電圧指令値  $V^*$  と直流電圧の上昇割合  $V_d/V_{d0}$  の積」と「周波数指令値  $f^*$ 」の比をとったものを図10に示す。 $V^*$  と  $V_d/V_{d0}$  の積は、直流電圧の上昇を考慮したモータ端子電圧を表す。 $V/f$  パターンをパターン2とすると回生初期のモータ端子電圧と周波数の比はほぼ一定で、図9(b)に示す電流の大きさも一定となる。

4.4 回生効率 コンデンサに蓄積される静電エネルギーは、回生動作前の電圧を  $V_{d0}$  として電圧  $V_d$  のとき

$$U = \frac{1}{2} C (V_d^2 - V_{d0}^2) \dots\dots\dots (4)$$

である。直流部に回生される回転エネルギーは最大回転数を  $\omega_{max}$  として回転数  $\omega$  のとき

$$U = \frac{1}{2} J \eta (\omega_{max}^2 - \omega^2) \dots\dots\dots (5)$$

となる。 $\eta$  はインバータ+モータの効率である。(4)式と(5)式が等しいことから、

$$\frac{1}{2} C (V_d^2 - V_{d0}^2) = \frac{1}{2} J \eta (\omega_{max}^2 - \omega^2) \dots\dots\dots (6)$$

と書ける。(6)式を変形すると、 $\eta$  は次式となる。

$$\eta = \frac{C (V_d^2 - V_{d0}^2)}{J (\omega_{max}^2 - \omega^2)} \dots\dots\dots (7)$$

4.2 の2つの  $V/f$  パターンについて、実験結果から(7)式を用いて計算した回生時のインバータ+モータの効率を図11に示す。 $V/f$  パターン2の方がパターン1より効率が低い。インバータ+モータの効率は  $V/f$  パターン2の最高値で60%程度であり、回転数が減少すると20%台まで低下した。

まえがきに述べた従来の検討のように、回転数によらず効率を一定と仮定することは適切でないことがわかる。

## 5. EDLC蓄電実験結果

電解コンデンサと並列にEDLCを接続して実験を行った。EDLCは1Fの製品(ELNA DZN-2R5D105T)を140個直列で用いた。

$V^*(f^*)$ 関数を4.2の  $V/f$  パターン2としたときの回転数変化と直流電圧変化を図12に示す。EDLCを加えると、電解コンデンサのみの場合に比べ静電容量が大きくなるため電圧変化幅は小さい。回生エネルギーは105Jである。

## 6. 結論

EDLC蓄電式エレベータの力行・回生運転時の速度制御特性とEDLCの電圧変化を実験で検証した。実物の1/10モデルで小形誘導電動機のすべり周波数制御を用いた実験ではあるが、EDLCの電圧変化に対しても速度制御系があれば対応できること、モータの回転数が低い時のモータ効率に注意すべきこと、すべり周波数制御では回生効率が高くなる制御方式を採用すべきであることなどが明らかになった。

## 文 献

- (1) 岡村迪夫:「電気二重層キャパシタと蓄電システム」第3版, 日刊工業新聞社(2005)
- (2) 峯村明憲, 八代昌大, 辻俊明, 金子裕良, 阿部茂, 電気二重層キャパシタのRC多段等価回路による充放電効率, 電気学会 半導体電力変換研究会資料, SPC-08-22, pp.7-12(2008).
- (3) 八代昌大, 太田圭祐, 金子裕良, 阿部茂, 電気二重層キャパシタ蓄電式エレベータの1日の詳細電力シミュレーション, 日本機械学会 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩, No.08-75, pp.27-30(2009)
- (4) 菅郁朗・富永真志・荒木博司・池島宏行・田島仁・楠間誠・小林和幸:「回生電力蓄電システムによる省エネエレベータの開発」, 電気学会パワーエレクトロニクス研究会資料, JSPE-27-5(2001)