

# 2604 電気鉄道用ハイブリッド電力貯蔵装置の充放電試験

## Charge/Discharge Test of Hybrid Energy Storage System for Electric Railway

正[電] ○小西 武史 正[電] 長谷 伸一 正[電] 中道 好信 ((財)鉄道総合技術研究所)

正[電] 奈良 秀隆 正[電] 上村 正 ((株)明電舎)

Takeshi KONISHI, Shin-ichi HASE, Yoshinobu NAKAMICHI, Railway Technical Research Institute.

2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Hidetaka NARA, Tadashi UEMURA, Meidensha Corporation. 36-2, Nihonbashi Hakozaiki-cho, Chuo-ku, Tokyo

Electric double-layer capacitors (EDLC) can be charged and discharged rapidly in a short time with large power, and features a long life without requiring frequent maintenance. On the other hand, a battery has a high energy density so that it is proper to be charged and discharged for a long time. Therefore, from a viewpoint of load pattern for electric railway, hybrid energy storage system applying both energy storage media may be effective. This paper introduces two methods for hybrid energy storage system, and describes the results of the charge/discharge tests.

**Keyword:** EDLC, battery, hybrid energy storage

### 1. はじめに

直流電気鉄道においては、車両パンタ点電圧降下、変電所の電力負荷変動、回生電力失効等を抑制するための電源安定化対策が重要な課題とされている。このため車両の回生時に電力を蓄電し、力行時に放電することにより負荷平準化、効率向上を図る電力貯蔵装置の導入が、効果的な対策として注目されている<sup>1)</sup>。

直流電気鉄道の電力負荷は、車両編成、地上設備によって多岐に分類される。例えば抵抗制御車の負荷は短時間で大きな変動を生じ、貨物列車は旅客列車よりも長くノッチを引っ張る傾向があるため負荷継続時間が長い、等の特徴を有する。それぞれの貯蔵媒体は長所、短所を併せ持っているため、単一の貯蔵媒体のみの適用による電力貯蔵装置では、あらゆる電鉄負荷に対し十分な充放電効果を求めることは難しいのが現状である。そこで、異なる電力貯蔵媒体を併用することにより、媒体それぞれの特徴を活かし、電気鉄道に適した電力貯蔵システムを構築できる可能性がある<sup>2,3)</sup>。

本稿では、急速充放電が可能で低公害、長寿命などの長所を有する電気二重層キャパシタ(Electric Double-Layer Capacitors:以下 EDLC と略す)とエネルギー密度が高く定電圧などの特徴を有する蓄電池を併用した電気鉄道用電力貯蔵(以降ハイブリッド電力貯蔵と称す)について述べる。まず回生電力対策型、電圧降下対策型として適当なハイブリッド電力貯蔵システムのそれぞれの概念について明らかにし、それをもとに直流 400V 用に試作したミニモデルによる充放電試験の結果について報告する。

### 2. ハイブリッド電力貯蔵の概念

電力貯蔵装置を電気鉄道に適用する際、目的に応じてシステムが異なる。本章では、回生電力対策と電圧降下対策を目的とした、ハイブリッド電力貯蔵の概念を述べる。

### 2.1 回生電力対策型

電気鉄道においては、回生と力行が交互に起きるとは限らず、上下線で回生が発生する事を踏まえると、少なくとも 2 回以上の回生に対応した大容量の電力貯蔵が必要となる。一方、回生電力の特徴として、比較的急峻な立ち上がりであること、立ち上がり時の電力吸収の追従遅れがあると車両側で回生絞りが発生し、さらには電圧上昇から回生失効に至ることが挙げられる。従って、立ち上がり時には急速充電が必要となる。

上記の事柄を踏まえると、回生電力対策型のハイブリッド電力貯蔵として Fig.1 の回路構成が考えられる。回生時の動作を以下に示す。

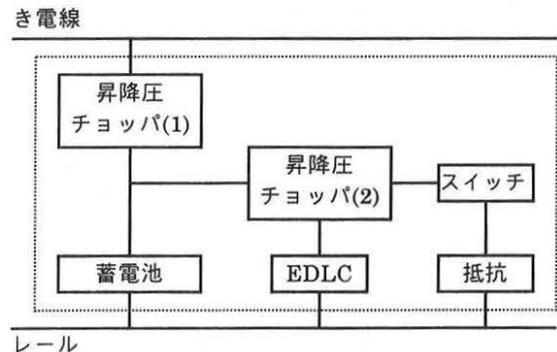


Fig. 1 Constitution of energy storage system for regenerative power

- ① 回生電流は、昇降圧チョップパ(1)を通して、蓄電池およびチョップパ(2)を経由して EDLC に分流して充電される。このとき何れのチョップパも降圧動作を行う。
- ② 立ち上がり時の急峻な電流は、EDLC の急速充電性に

より、EDLCに大きく分流するが、EDLCの蓄積電力量の増大に伴い、蓄電池側への分流が大きくなる。

- ③ 回生終了後、チョッパ(1)を停止し、EDLCの電力をチョッパ(2)を介して蓄電池に充電する。これにより、EDLCは放電状態となり、次の回生電力への待機状態となる。
- ④ 蓄電池の充電量が大きく、EDLCに充電された電力を蓄電池が吸収できない場合が考えられる。そこで蓄電池電圧を監視し、満充電に相当する電圧が一定時間(5分程度)継続した場合にはスイッチを投入し、抵抗による蓄電池の低電流放電を行う。

このシステムを実現するためには、蓄電池の充電容量は回生電力の2倍以上が必要となる。また、蓄電池には急速充電、繰り返し寿命を考慮し、充電電流を低い値(0.5C以下)に抑制する必要がある。

## 2.2 電圧降下対策型

2.1節で述べた回生電力対策型は、EDLCを常時放電状態とし、回生時の急峻な波形に追従することを目的としたシステムである。このため、力行電流に対しては蓄電池の特性に支配された放電特性となるため、急速放電への対応は難しい。また、回生車両が運行されていない線区では、電動機の直並列制御による力行時の電流変化が大きくなり、急速放電が必要とされる。一方、蓄電池とEDLCを直接に並列接続した場合、蓄電池がEDLCに常時充電を行うことから、放電電流の立ち上がり小さくなり、蓄電池とEDLCの並列効果が低減する。

上記の事柄を踏まえ、電圧降下対策用で回生対策が不要の場合にはFig.2のシステムが適当と考えられる。力行時の動作を以下に示す。

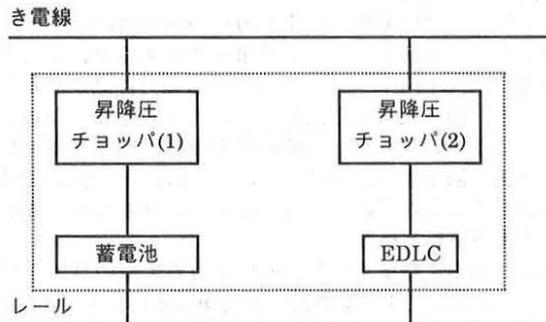


Fig. 2 Constitution of energy storage system for voltage drop compensation

- ① 無負荷電圧より若干低い電圧で、蓄電池とEDLCを充電する。この電圧は、列車の運転間隔内に蓄電池とEDLCが充電完了となる値を選定する。チョッパ(1)、(2)は降圧動作を行う。充電電流は両者とも低く選定する。
- ② 蓄電池電圧が一定値に達するまで充電した時点で、チョッパ(1)を停止し放電待機状態とする。また、EDLCの端子電圧が、設定した初期充電電圧に達した時点でチョッパ(2)を停止し、放電待機状態とする。
- ③ き電線電圧が低下した時点でチョッパ(1)、(2)の昇圧動作により蓄電池とEDLCより放電を開始する。

チョッパ(1)、(2)の放電開始時に差電圧を設けることにより、立ち上がり放電特性を変えることが可能であり、適切な値を選定することにより、媒体の長所を活かした放電が可能となる。

## 3. 直流400V用ハイブリッド電力貯蔵ミニモデル

これまでに電気鉄道用電力貯蔵の基礎検討として、EDLC

を用いた直流400V系電力貯蔵ミニモデルによる試験を実施してきた<sup>1)</sup>。従来のミニモデルに蓄電池、新たな昇降圧チョッパを増設することにより、ハイブリッド電力貯蔵の基礎検討を行う。

電力貯蔵ミニモデルの回路構成(回生電力対策型)をFig.3に示す。電圧、電流はそれぞれ実系の1/4、1/10のモデルである。直流き電回路は、変電所模擬としてのダイオード整流器、車両模擬負荷としてPWMコンバータ、き電線インピーダンスとしての抵抗、リアクトルから構成される。抵抗、リアクトルは何れも0.04Ω、1mHとしている。ここでは変電所と車両の間隔は8kmの模擬とし、変電所と車両の中間に電力貯蔵装置が設置される模擬とした。昇降圧チョッパは2台とも構造は同様であり、変換器(IGBT)、フィルタ用リアクトル、コンデンサで構成される。チョッピング周波数は何れも4kHzである。蓄電池用の放電抵抗は8.25Ωであり、40Aで2分間の放電が可能である。ダイオード整流器、PWMコンバータに関する詳細は既報<sup>1)</sup>を参照されたい。

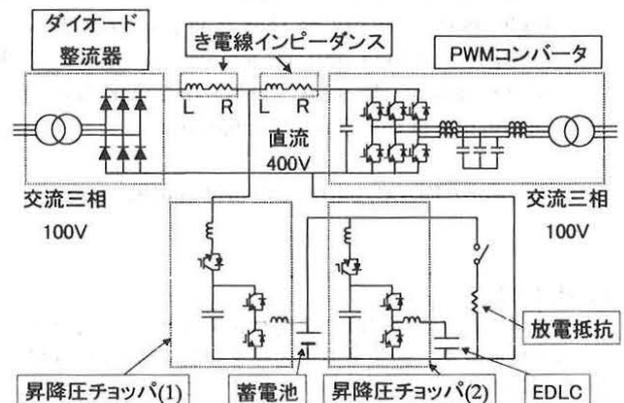


Fig. 3 Main circuit of the prototype

ミニモデルに使用するEDLC、蓄電池の仕様を表1に示す。EDLCのセル接続は直列と並列の組合わせであり、蓄電池は全セルを直列に接続している。蓄電池1セル当たりの最低許容電圧は1.8V、最高使用電圧は2.8Vであるが、今回のシステムでは過充電もしくは過放電による劣化を防止するため、2.0~2.3Vに制限している。

Table 1. Specification of EDLC and battery

| 貯蔵媒体 | EDLC                 | 蓄電池                   |
|------|----------------------|-----------------------|
| 構成   | 全 1104 セル            | 全 144 セル              |
| 電圧   | 280V (最大値)           | 288~330V              |
| 電流   | 400A (最大値)           | 200Ah                 |
| 静電容量 | 32F                  |                       |
| 内部抵抗 | 0.16Ω                | 0.072Ω                |
| 外形寸法 | D1000W900<br>H2300mm | D1018W1450<br>H1835mm |
| 重量   | 715kg                | 2400kg                |

従来のミニモデルで使用した昇降圧チョッパは、Fig.1及びFig.2の(1)に相当する。一方、ハイブリッド電力貯蔵用に新たに試作した昇降圧チョッパは(2)に相当し、EDLCの充放電を制御する。2台のチョッパの制御による、EDLC、蓄電池の各制限パラメータを表2に示す。各パラメータの設定理由を以下に述べる。

回生電力対策……EDLC の初期電圧を低く設定し、充電容量を大きくする。EDLC は蓄電池の電圧を監視し、その変動にあわせて充放電を開始する。

電圧降下対策……回生電力対策とは逆に、EDLC の初期電圧を比較的高く設定し、放電容量を大きくする。EDLC は蓄電池と同様に電側の電圧を監視し、その変動にあわせて充放電を開始する。力行初期時の EDLC の放電容量を大きくするために、蓄電池の電流範囲を狭める。

Table 2. Set values of EDLC and battery

|      | 対策     | 回生電力      | 電圧降下       |
|------|--------|-----------|------------|
| EDLC | 初期電圧   | 130V      | 180V       |
|      | 電圧     | 120~270V  | 120~270 V  |
|      | 電流     | -200~200A | -200~200A  |
|      | 放電開始電圧 | 298V      | 390V       |
|      | 充電開始電圧 | 308V      | 416V       |
| 蓄電池  | 初期電圧   | 302V      | 302V       |
|      | 電圧     | 290V~330V | 290~330V   |
|      | 電流     | -200~200A | -175A~175A |
|      | 放電開始電圧 | 390V      | 390V       |
|      | 充電開始電圧 | 416V      | 416V       |

#### 4. 基礎試験

##### 4.1 回生対策型の特性

回生電力対策型による、1分間の力行、回生における充放電特性の一例を Fig.4 に示す。本稿では、車両の力行電流を正、回生電流を負、貯蔵媒体の放電電流を正、充電電流を負とする。

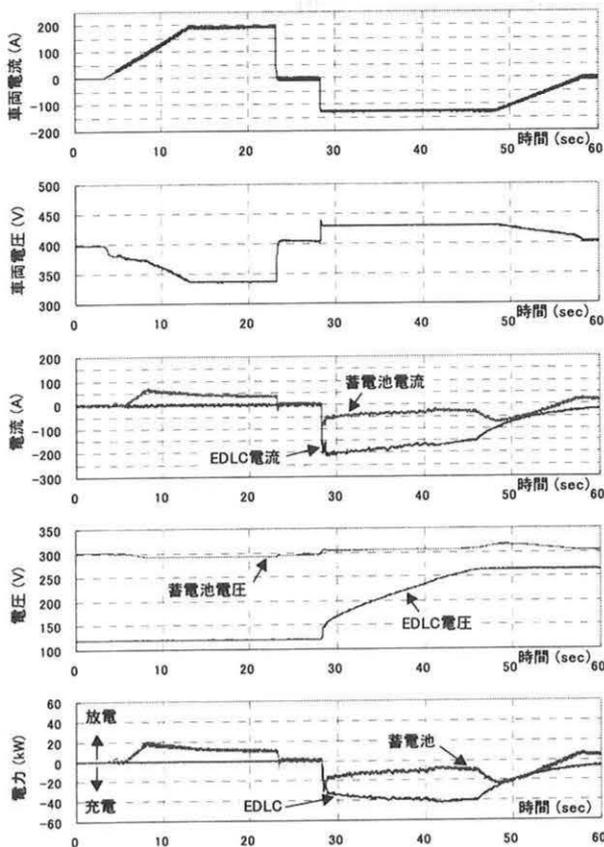


Fig.4 Characteristics of regeneration power type

車両負荷電流は、Fig.4 の 1 段目に示すとおり、最大力行電流を 200A、最大回生電流を 130A、力行時間を 20sec、回生時間を 30sec とし、回生の継続時間を長めに設定した。さらに、パターンの待機時間は 240sec に設定した。Fig.4 の 3~5 段目に示した EDLC、蓄電池の充放電特性を時間毎にまとめると、以下のことが言える。

- (1) 力行時(3~23sec)…EDLC は初期充電されていないので、放電しない。蓄電池は 50A 以下の低電流で放電する。
- (2) 回生時(28sec)…EDLC は 200A で、蓄電池は約 100A で充電する。
- (3) 回生時(28~46sec)…EDLC に殆ど充電される。
- (4) 回生時(46~50sec)…EDLC 電圧が上限の 270V に近づき、EDLC が満充電状態近くに至ったため、蓄電池の充電電流が再び上昇する。

上記の特性は、2.1 節に示した②項の概念を満たしている。また、回生時における車両電圧の極端な上昇は生じていないことから、本システムが回生失効対策に対し十分寄与したことを示している。

上述の充放電の終了後は待機状態に移行し、EDLC 電圧は Fig.5 に示すように徐々に低下する。この特性は、チョッパ(2)の動作により EDLC の充電電力を蓄電池に吸収させることを示しており、約 5 分後に EDLC 電圧は初期電圧まで戻る。このことは、2.1 節の③項の概念を満たしている。なお、蓄電池電圧に関しては、力行、回生時に電圧が 10V 程度変動するが、理由としては蓄電池の内部抵抗の影響が大部分を占める。待機時間中に蓄電池は EDLC の電力を充電するが、低電流のため蓄電池電圧の上昇は微少である。

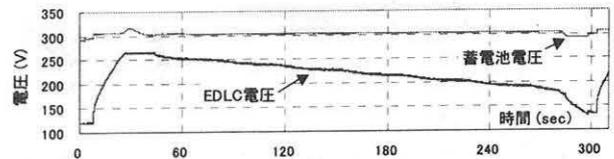


Fig.5 Charge characteristic from EDLC to battery

##### 4.2 電圧降下対策型の特性

電圧降下対策型による、力行、回生時の充放電特性の一例を Fig.6 に示す。本稿では、車両負荷は、Fig.6 の 1 段目のグラフに示すとおり、最大力行電流を 90A、最大回生電流を 100A、力行時間を 30sec、回生時間を 20sec とし、力行時間を長めに設定した。変電所特性、車両特性及び EDLC、蓄電池の充放電特性を時間毎にまとめると、以下のことが言える。

- (1) 力行時(4~16sec)…力行開始後まもなく直流電圧が 390V 以下となるため、EDLC が放電を開始する。EDLC の放電電流は最大 150A まで上昇し、EDLC 電圧は時間に比例して低下する。
- (2) 力行時(16~33sec)…EDLC 電圧が下限の 120V に近づき EDLC の放電能力が低下したため、蓄電池が 100A 程度で放電を開始する。貯蔵装置の放電により、変電所電流は 50A 以下に抑制される(貯蔵装置がない場合は車両力行電流と同じ 90A)。また、車両電圧は 370V 以上に抑制される(貯蔵装置がない場合は 360V 以下まで低下)。
- (3) 回生時(38~58sec)…EDLC、蓄電池が交互に充電される。これは昇降圧チョッパ(1)、(2)の充電開始電圧を等しくしていることで、それぞれのチョッパ電圧の微少な変動によって充電される貯蔵媒体が異なるためと考えられる。なお、EDLC 電圧は充電により初期電圧まで回復しているため、次の力行にも対応可能である。

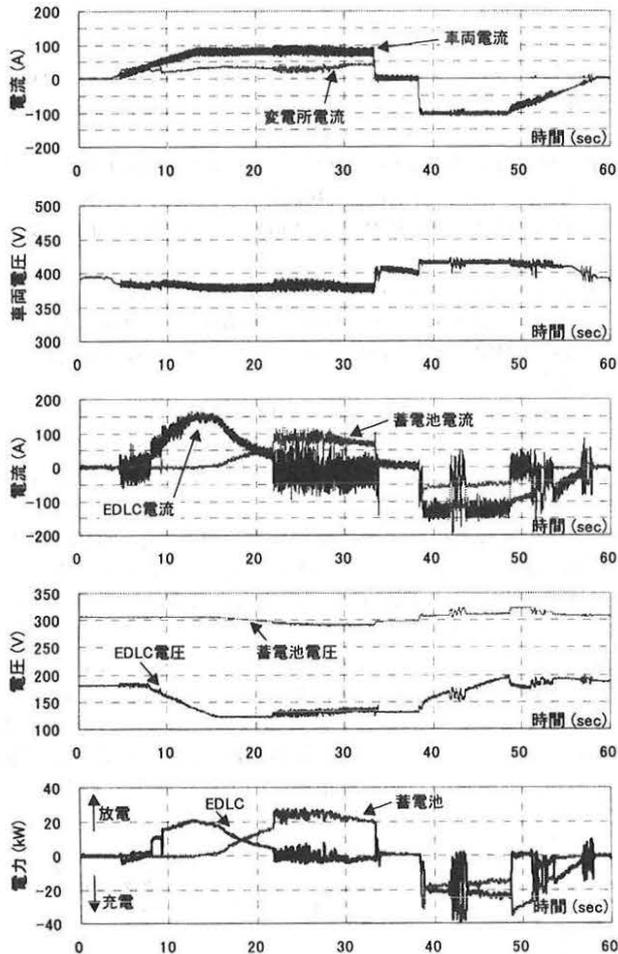


Fig.6 Characteristics of voltage drop compensation type

上記の(1), (2)の特性は, 本システムが, 電圧降下抑制及び変電所電流抑制対策として有効に機能していることを示している。さらに EDLC が力行初期時に放電し, 一定時間経過した後に蓄電池の放電分が増加することにより, 貯蔵媒体それぞれの長所を活かした放電の分担が実現されたことを示している。

## 5. むすび

EDLC と蓄電池を併用した電力貯蔵装置について, 回生電力対策及び電圧降下対策のシステムを明らかにした。さらに直流 400V 系電力貯蔵ミニモデルの製作及びその充放電試験結果より, それらのシステムの, 電気鉄道適用への有効性を示した。今後は, 貯蔵装置間の電力融通の最適な制御手法を検討し, ハイブリッド電力貯蔵に関する研究の深度化を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 長谷, 小西, 奥井, 中道, 奈良, 上村: 「電気二重層キャパシタを用いた電力貯蔵装置の電気鉄道への適用に関する基礎的検討」, 電学論 D, Vol.123, No.5, pp.517-524, 2003.5
- 2) T.A.Smith et al.: USING SUPERCAPACITORS TO IMPROVE BATTERY PERFORMANCE, PESC'02, 2002 IEEE33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol.1, pp.124-128, 2002.6
- 3) 長谷川, 小関, 吉田, 中野: 「燃料電池と電気二重層コンデンサを用いた電気自動車用電源システムの開発」, H13年電学全, Vol.4, No.4-206, pp.1528-1529, 2001.3
- 4) 長谷, 小西, 奥井, 中道, 奈良, 上村: 「電気二重層キャパシタを用いた電力貯蔵システムの基礎試験」, J-RAIL'01, pp.389-392, 2001.12