

■ 技術報告 ■

# 電気鉄道における省エネルギー機器

## Energy-saving Equipment in Electric Railways

居 蔵 和 徳\*

Kazunori Igura

### 1. ま え が き

鉄道輸送における社会的ニーズは、「速達」「安全」「確実」「快適」「安価」など多くの項目があるが、「安価」の項目としてはランニングコストの低減が肝要であり、省エネルギーの社会的要請とも相まって輸送におけるエネルギー消費の効率化は重要なテーマである。

旅客輸送でのエネルギー消費原単位(kcal/人キロ)は、鉄道に較べると営業用バス(1.6) 自家用乗用車(7.4) 航空機(7.2)であり、鉄道はエネルギー消費効率に秀れている。快適性やドア ツウ ドアと言った利便性などのサービスの質において乗用車の魅力が勝っているが、最近実用化されつつある軽快電車や新交通システムがマイカーからの転換を誘導できれば、全体としての輸送エネルギーが低減されることになりこの面でも期待される。

電気鉄道におけるエネルギー消費を大きく分類すると、列車を駆動するとき消費される走行電力と駅設備等で消費される付帯電力とがある。受電容量中に占める付帯電力は、効外電車では約20~30%、地下鉄では60~70%を占め、付帯設備に対する省エネルギー対策も重要であって、各電鉄会社においては照明、エスカレータ運転時間、冷房温度の調整等重要課題として取り組まれている。この技術報告においては、列車を駆動するための走行電力に関して省エネルギーの観点から低消費電力方策を実現するための機器について紹介する。

### 2. 列車走行における省エネルギー方策

一般の列車駆動に用いられている直流直巻電動機の

回転数  $n$  は、次式で表わされる。

$$n = \frac{(V - IR) - rI}{K\phi(I)} = \frac{E - rI}{K\phi(I)} \dots\dots(1)$$

$V$  : 供給電圧  $\phi(I)$  : 電流  $I$  での界磁磁束

$R$  : 外部直列抵抗  $r$  : 電動機内部抵抗

$E$  : 電動機端子電圧

従って、直流直巻電動機の力行速度制御法としては

- (1) 外部直列抵抗  $R$  を変える抵抗制御法
- (2) 見掛上の供給電圧  $V$  を変える直並列制御法
- (3) 界磁磁束を変えする界磁制御法

があり、抵抗制御車では以上の3方法が組み合わされて使用されている。又、ブレーキ制御は、主電動機を発電機として働かせ、運動エネルギーを熱エネルギーとして抵抗器で消費させる発電ブレーキと機械ブレーキを併用するのが一般的である。

図-1は抵抗制御車が駅間を走行するときのエネルギー変遷を示すものであり、消費されるエネルギー比率は概略次のようになっている。

- (1) 発電ブレーキ損 45.3%
- (2) 走行抵抗損 21.8%

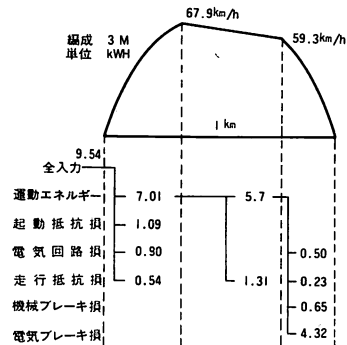


図-1 エネルギー変遷図

\*三菱電機㈱伊丹製作所交通技術部主幹  
 ● 661 尼崎市南清水字中野80

- (3) 電気回路損 14.7%
- (4) 起動抵抗損 11.4%
- (5) 機械ブレーキ損 6.8%

この例から、列車の走行電力における省エネルギー技術方策は次のように集約される。

- (1) パワーエレクトロニクス採用による起動抵抗損及び発電ブレーキ損の無損失化
- (2) 回生ブレーキ時のエネルギー完全吸収化
- (3) 走行抵抗損の軽減
- (4) 機器の高効率化

又、このエネルギー変遷図からは直接表現されていないが、運動エネルギーや走抗抵抗損は車輛重量に応じて増加するので、車輛の重量軽減は省エネルギーでの大きな要因となる。さらに、運転方式は走行時分とも関連するがエネルギー消費量に大きな影響を及ぼす。

こゝではパワーエレクトロニクス、電力回生及び重量軽減と運転方式のシミュレーション結果を中心に記述する。

### 3. 車輛の軽量化

運動エネルギーは  $1/2 MV^2$  (M: 総重量, V: 速度) で表されるが、出発抵抗・走行抵抗・機械ブレーキ損などのため、起動に使われたエネルギーを全て回収することは出来ない。従って、車輛の軽量化はエネルギー消費量を少なくするのに有効であると言える。こゝで、或る路線をモデルにし、車輛重量を軽減した場合のエネルギー消費についてシミュレーションを行った結果を図-2に示す。

シミュレーション条件

- 路線長: 15km      駅数: 15
- 車輛編成: 2M2T      満車重量: 180 ton
- 加減速度:  $\alpha = 3$ ,  $\beta = 3.5 \text{ km/h/s}$
- 最高速度: 75km/h
- 制御方式: チョップ制御 (回生付)

この結果から、消費電力 (起動電力一回生電力) は、荷重を含めた総重量に対しての軽減量に比例していることが判る。

車輛の軽量化として一番効果のあるのは車体のアルミ化であり、或る例では15%の軽量化が行なわれ、これによる電力節減は約14%と報告されている。

### 4. 運転方式による省エネルギー化

駅間走行の運転方式として、

- 方式A: 比例制御による定速走行方式

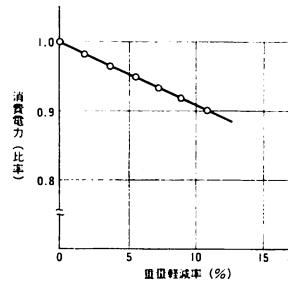


図-2 軽量化による省エネルギー効果

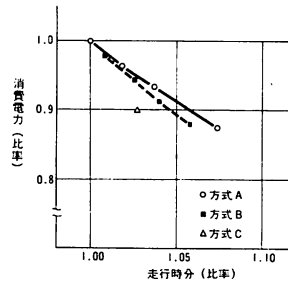


図-3 走行時分と消費電力

方式B: オン・オフ制御による定速走行方式

方式C: ティピカル・ランに近づけた走行方式

この3方式について、先と同じ条件でシミュレーションを行ない、走行時分と消費電力の関係を求めた。結果を図-3に示す。これによれば、

- (1) 走行時分を長くすれば消費電力が低減される。
- (2) 常時通電している方式Aに較べ、惰行を入れた方式Bの方が消費電力が少ない。
- (3) 勾配条件を考慮して惰行走行を最大限取り入れた方式Cが省エネルギー的には最も効果的である。
- (4) 乗心地も良く、走行時分を最短に出来るのは方式Aである。

従って、ラッシュ時は走行時分の短縮を重視して方式Aによる運転を行ない、閑散時には省エネルギーを重視して方式Cによる運転を行なうことが効果的である。マイコンを応用した自動運転装置 (ATO) が実用化され、すでに比例制御方式による走行が行なわれているが、路線条件をメモリーし、省エネルギーに最適な運転パターンで走行させることも技術的に可能となってきた。

### 5. パワーエレクトロニクス化

抵抗制御車の起動抵抗損は、(1)式に示されるように電動機端子電圧を変えて速度制御するため電動機と直

列に挿入される外部抵抗の損失である。従って、直流電動機の場合は、パワエレクトロニクスを用い、基本的には電動機端子電圧を制御することで起動抵抗損の無損失化とブレーキの回生化が行なえる。交流電動機  
の速度制御は、電圧制御によっても可能であるが、電気車のように広範囲な速度制御を行なうには電源周波数を変えて制御することが必要である。こゝでは、すでに実用化されているもの、もしくは実用化の近い代表例について概容を紹介する。

5.1 チョップ制御電車

電車制御用チョップには、大別して電機子チョップ、界磁チョップ、抵抗チョップがあるが、一般にチョップと言えば電機子チョップを意味することが多いのでこゝでは電機子チョップについて述べる。図-4に力行基本回路と波形を示す。電車線からの入力端にはフィルタ用のリアクトルFLとコンデンサFCが設けられており、高調波電流の流出を抑制する。チョップがオンされると実線で示す電流  $I_s$  が電車線から供給され、オフされると主平滑リアクトルMSLに蓄積されたエネルギーにより、フリホイーリングダイオードDを通して破線  $I_D$  のように電流が環流する。電動機の端子電圧は  $E_M = (T_{ON} / T) \cdot E_s$  で表わされ、 $T_{ON} / T$  (通流率) によって連続的に電圧を制御できるので、本質的に無損失の速度制御が行なえる。

ブレーキ時は、図-5に示す基本回路に接続が変更される。チョップがオンされると主電動機(発電機)を平滑リアクトルで短絡するので電流  $I_{cH}$  が上昇し、チョップがオフされると平滑リアクトルに蓄えられたエネルギーが電圧となって発生し、主電動機より電圧の高い電車線へ破線電流  $I_s$  のように回生電流として流れる。低速になって主電動機電圧が低くなると、チョップのオン時間を長くして電流  $I_{cH}$  を充分上昇させることによって、停止直前まで回生ブレーキを作用させることが出来る。逆に、主電動機電圧が電車線電圧よりも高いと、チョップがオフしているときも電流が上昇し続けて制御不能となるので、高速時は主電動機電流を絞って発生電圧を抑制することが必要となる。この時はブレーキ力が不足するので機械ブレーキで補足する必要がある。

5.2 単相交流電車

単相交流電圧をサイリスタブリッジで整流し、直流電動機を電圧制御によって駆動するもので、ED78や新幹線で代表される方式である。図-6はこの方式の基本回路例で、単相ブリッジが4段連続接続されている。

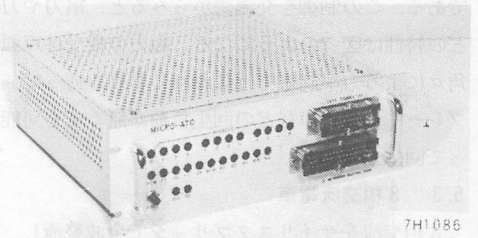


写真1 マイコン応用ATC装置

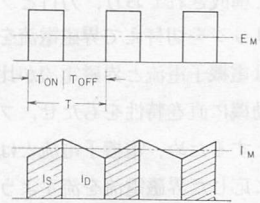
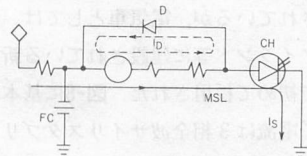


図-4 力行回路

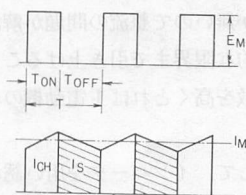
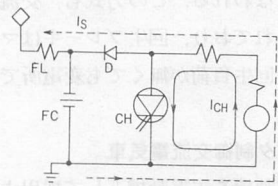


図-5 回生ブレーキ回路

多段接続は直流出力電圧のリプル分を小さくすると共に交流側高調波成分の軽減を狙ったものである。対称制御方式では、各ブリッジの対辺アームを同時に点弧するが、ブリッジ①と②が  $\alpha = 0^\circ$ 、③と④が  $\alpha =$  最大 ( $r_{min} = \pi - \alpha_{max}$ ) の状態では、合計の出力電圧はほぼゼロとなる。この状態から③と④のブリッジの  $\alpha$  を順次ゼロに近づければ、正の全電圧まで連続的に制御することができる。これが力行時の制御であるが、回生時は①と②のブリッジの  $\alpha$  を順次大きくして  $r_{min}$  まで近づければ連続的に負の全電圧までの制御が可能

である。この制御を交流側からみると、電力や力率などの特性は図-7のようになる。電力の授受は点弧位相角 $\alpha$ による力率制御で行なわれており、従って、回生ブレーキは力行車などの回生負荷が無くても可能であって回生効率が良い。

### 5.3 3相交流電車

3相交流をサイリスタブリッジで全波整流し、直流電動機を制御する方式でサイリスタレオナードと呼ばれる。鉄鋼分野ではミル用電動機の世界速度制御等に古くから使用されているが、電気車としては、我国では神戸ポートアイランド等に建設されている新交通システム用車輦で初めて採用された。図-8に基本回路を示すが、電機子電流は3相全波サイリスタブリッジにて制御され、一方、界磁回路は2組の単相全波サイリスタブリッジで構成されており、力行とブレーキとでは使用するブリッジを切替えて界磁電流を制御している。力行時には電機子電流と界磁電流が比例するように制御して電動機に直巻特性をもたせ、ブレーキ時は他励分巻特性とするため、電機子電流とは独立して指令ブレーキ力に応じた界磁電流を流すようにしてある。電動機制御はサイリスタの位相制御による電圧の連続的变化によって行なわれる。この方式も、交流側からみれば力率制御されており、回生ブレーキはマイナス力率で運転され、回生負荷が無くても変電所で回生することが出来る。

### 5.4 インバータ制御交流電気車

かご形誘導電動機を主電動機として採用すれば、整流子やブラシが無いので整流の問題が解決する。又、回転数を機械的な限界まで引き上げることができるので、定格回転数を高くとれば主電動機の小型軽量化が図れる。

電気車用として、インバータを用い誘導電動機を制御する方式は、ヨーロッパで一部実用化されているが、わが国では、昭和51年に日本鉄道技術協会の事業として開発が行なわれ、その後もメーカにおいて引き続き開発が進められているが、未だ実用に供されていない。主電動機が小型化できることから、小型地下鉄や路面電車への適用が期待される。

誘導電動機の発生トルクは、スベリ $S$ の小さい範囲では近似的に次式で表わされる。

$$T \propto (sf) \times (E_1/f)^2$$

( $f$ : 運転周波数  $E_1$ : 1次コイル誘起電圧)

定トルク運転を行なうには、スベリ周波数( $sf$ )を一定に保ち、 $E_1/f$ が一定になるように制御すればよい。

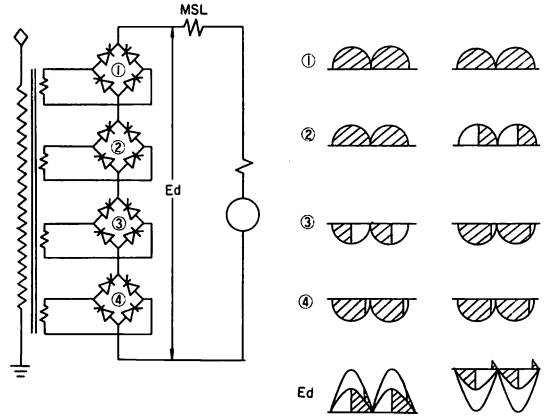


図-6 4段縦続接続回路

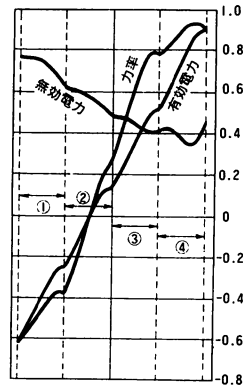


図-7 4段縦続接続の電力と力率

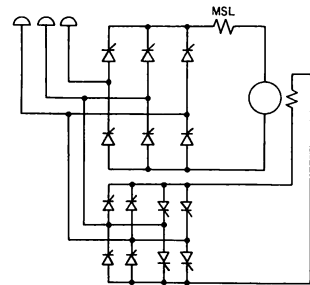


図-8 サイリスタレオナード回路

図-9にインバータ主回路の基本図を示すが、このサイリスタの点弧は、正弦波と三角波形の大きさを比較して得られるパルス巾変調されたパルス列によって行なわれ、 $E_1/f$ 一定制御は例えば正弦波の振幅を $f$ に比例させることで行なっている。図-10から判るように、こうして得られた電圧波形は近似的に正弦波に近くトルクリップルが軽減される。

ブレーキは主回路を切替えることなく、スベリ周波数( $sf$ )を負の値とすることで簡単に回生ブレーキとす

ることが出来る。又、前後進の切替も制御回路の3相の相順を変えるだけで行なえ主回路の切替えは不要であり、回路切替のためのスイッチ類が無く主回路構成が簡単になる。

### 5.5 フロン沸騰冷却

大容量高速サイリスタとして2500 V, 1000 Aの素子が実用化され、従来、素子を直並列接続にて使用していた分野では、大巾な素子の削減が可能となった。これによって素子周辺回路も簡略化でき、機器の小型軽量化に大きく寄与できる。しかし、このような大容量素子では電極面の単位面積当たりの発生熱量が $10w/cm^2$ になるので効率の良い冷却方式が要求される。

フロン沸騰冷却は、冷却媒体として沸点の低いフロンを用い、発熱体に面したフロン液が沸騰気化するときの蒸発潜熱を利用するものである。図-11において、素子から熱を奪って気化した冷媒は蒸気管を通して圧力の低下した凝縮器内へ移行する。ここで蒸気は周囲空気によって冷却されて液化し、液もどり管を通して再び蒸発器へもどる。このように、ポンプ無しで自然循環により大量の熱輸送が可能で、沸騰による熱伝達率は空冷に較べて約100倍の特性を有している。

この冷却方式は、強制風冷でのブローが不要でそれだけ軽量化でき、ブロー駆動用の電源が不要となるため補機電源の小容量化が図られる。更に、素子がタンク内に密閉されるので塵埃などによる汚損で絶縁が劣化することがなく、信頼性・保守性が大巾に向上される。

## 6 電力回生装置

交流き電の場合の電動機制御は、交流側からみれば本質的には力率制御であり、負力率のとき回生ブレーキが行なわれる。従って、地上変電所設備には回生ブレーキのための特別な装置は不要である。

直流き電方式はダイオードブリッジによる順変換が行なわれるので、電流を逆方向に流すことが出来ず、従って、回生ブレーキ電流を交流側に返還することは不可能である。このため力車や補機電源などの回生負荷が不足すると電車線電圧が上昇し、機器の絶縁や温度上昇の問題が生じる。それで、回生車輛は電車線電圧が限度を超えると回生電流を絞って電圧の上昇を抑制しているが、この時はブレーキ力が不足するため空気ブレーキで補足する。このように回生ブレーキが失効してしまう現象を「回生空振り」と言っているが、チョッパ制御電車の実測回生率は表1のように報告さ

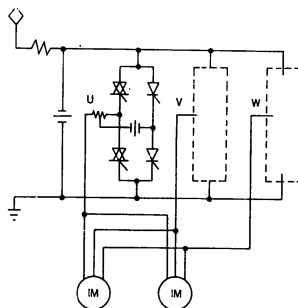


図-9 インバータ制御回路

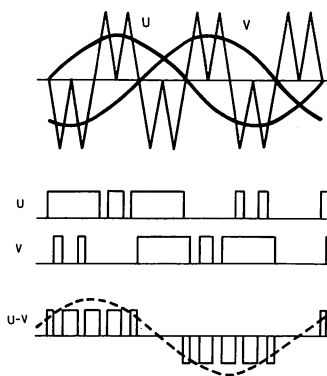


図-10 パルス巾変調原理

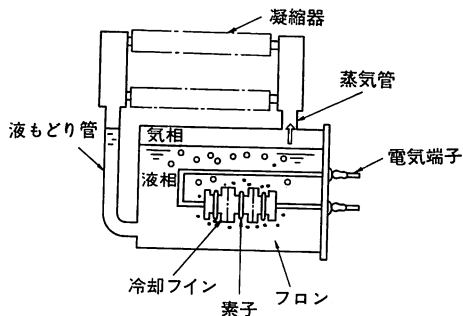


図-11 フロン冷却装置概略図

れている。

電力回生装置が設置されると、回生負荷が無いときでも確実に電力回生ができ省エネルギー的に有効であるが、その他次のような効果があげられる。

- (1) 下り勾配での抑速ブレーキが確実に行なえ、安全性の向上と安定な運転が可能となる。
- (2) ブレーキ力の急変が生じないため自動運転による定位置停止制御の精度が向上する。
- (3) 空気ブレーキの動作頻度が減少し、ブレーキシューの摩耗が少なく保守周期が延引できる。

表 1 チョップパ車回生率（実測値）

会社名	地下鉄線区				郊外線区		
	札幌市交	営団		名古屋市交	大阪市交	南海電鉄	近畿日本鉄道
線区名	東西線	千代田線	有楽町線	鶴舞線	御堂筋線	高野線	京都・橿原線
形式	6000系	6000系	7000系	3000系	10系	8000系	3000系
電気方式	DC1500V	DC1500V	DC1500V	DC1500V	DC750V	DC1500V	DC1500V
主電動機	70kW×16	145kW×8	150kW×8	135kW×8	130kW×8	155kW×8	165kW×8
チョップ方式	電機子	電機子	AVF	AVF	電機子	AVF	電機子
回生率	8%*	24.4%	28.9%	26.7%	26.1%	26.9%	26.2%

\*変電所出力

### 6.1 回生インバータ装置

回生インバータをもつ直流き電回路の単結線図を図-12に示す。図において回生インバータINVはシリコン整流器SRとは素子の向きが逆になっているが、制御角を $\alpha > 90^\circ$ で制御すれば図示した極性の電圧を発生し、これに打ち勝って回生ブレーキ車からの電流を流しこめば電力回生が行なわれる。図-13は回生インバータ変電所の制御動作を示すもので、領域Ⅰではシリコン整流器で電力を供給し、領域Ⅱはインバータへの制御切替が自動的に行なわれる区間である。領域Ⅲはインバータが $\gamma_{\min}(\gamma = \pi - \alpha)$ で運転される領域であり、回生電流の増加に応じて端子電圧が上昇し、 $E_{di}$ に達すると領域Ⅳの制御が行なわれる。この領域Ⅳでは、回生電流に応じて制御進み角 $\gamma$ を制御し、出力電圧 $E_{di}$ が一定になるよう制御される。回生された電力は、交流側母線に接続された照明・エスカレータ・換気設備等の高配負荷に供給消費される。

回生インバータの設備容量や設置位置については、ランカブシミュレーションと電力シミュレーションのプログラムを用い、実際に近い状態での運転を行なわせ、経済性を考慮しながら最適設計を実施している。

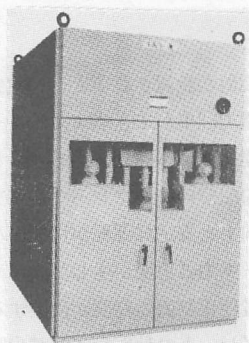


写真 2 フロン冷却式回生インバータ装置

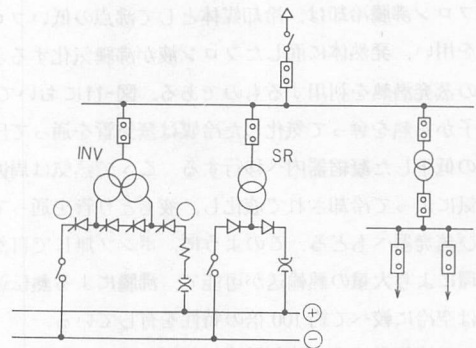


図-12 直流回生変電所単結線図

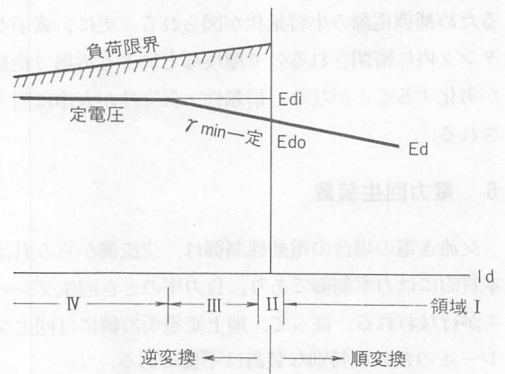


図-13 インバータ動作パターン

### 6.2 フライホイール式エネルギー蓄積装置

フライホイール装置には車上式と地上式があるが、ここでは最近わが国で開発された地上式装置について述べる。図-14はフライホイール式エネルギー蓄積装置の原理図で、エネルギーの授受をフライホイールモータを介して行なうものである。電車線に生じた余剰電力は、フライホイールモータを電動機として作用させ、フライホイールの回転数を上昇させることで機械的回転エネルギーとして蓄えられる。エネルギーの放出は、

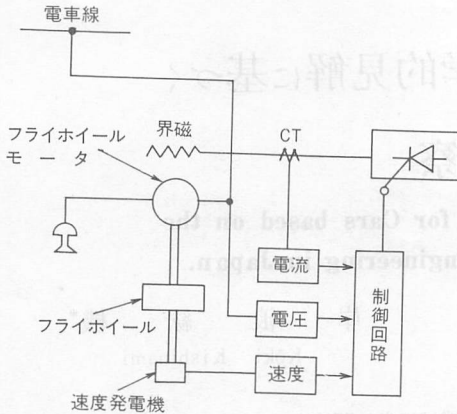


図-14 フライホイール式エネルギー蓄積装置

表 2 フライホイール仕様

蓄積エネルギー量	約 15 kWh
$GD^2$	20.5ton $\cdot m^2$
回転速度	800 ~ 1600 rpm
構造	中実円板方式
寸法・外径	2000 mm
重量	10.0 ton

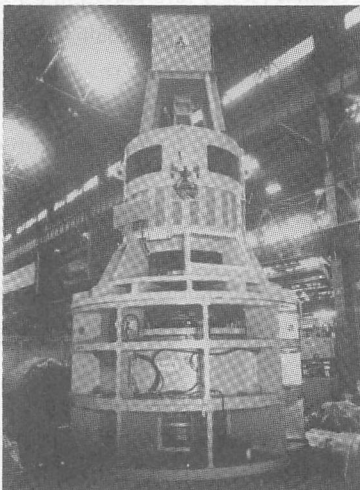


写真 3 フライホイール式電車線電力蓄積装置

フライホイールモータを発電機動作させて電力として放出する。このとき、フライホイールが最高速度に達すると速度一定の制御が行なわれて電力吸収は抑制され、また、最低速度になると電力供給を止めて速度一

定制御される。

フライホイール装置はエネルギーを蓄積することが出来るので、力行車に対しては変電所の機能を有し、変電所のピークカットや電車線末端での電圧降下補償が行なえる。フライホイールの実用化には装置の回転損失を最小限にすることが重要テーマとなる。このため、フライホイールは密閉構造のケーシングに収納され真空脱気することで回転風損を無視できるほどに減らすと共に、磁気軸受によってフライホイールを吸引支持する方式がとられている。

## 7 あとがき

電気鉄道はエネルギー効率的に秀れた輸送手段であり、これまで進められてきた鉄道の電化や、パワーエレクトロニクス及びマイクロエレクトロニクスの技術進歩に支えられた種々の技術開発は、まさしく省エネルギー面での社会的要請にマッチしたものである。我々メーカーとしても、今後も一層省エネルギーのための開発努力を行なっていきたい。

電気鉄道における省エネルギーに関して少しでも多くの機種を紹介することに努めたため、記述が概要説明になった。ここで紹介したものについては多くの文献が出されており、詳細はこれらを参考にしていただきたい。その代表例を参考文献としてあげたが、筆者もこれらに負うところが多く、ここに謝意を表する。

### (参考文献)

- (1) 「運転協会誌(省エネルギー小特集号) No 9, 1979
- (2) 稲垣・渡辺「電車アルミ化による電力節減について」電気車の科学 No 5, 1977
- (3) 成戸・四方「電鉄における回生ブレー併用チョッパ制御装置」三菱電機技報 No 12, 1979
- (4) 川添「交流電車車両要論」電気車研究会刊
- (5) 赤松・居蔵他「パルス巾変調式インバータによる車両用主電動機の運転」三菱電機技報 No 12, 1977
- (6) 刈田「わかりやすいチョッパ制御電車」電気車の科学 No 3, 1980 他
- (7) 太田・三金他「自冷式沸騰冷却チョッパ装置」三菱電機技報 No 7, 1978
- (8) 鈴木・米畑「電鉄回生変電所用サイリスタインバータ装置」三菱電機技報 No 6, 1977
- (9) 河村・星野他「フライホイール技術の電鉄変電所への応用」昭55電気四学会連合大会