

1507 新コンセプトに基づく鉄道車両の製作と運転報告 (新油圧制御理論と高効率フライホイールによる省エネルギー車両の開発過程と両技術の解説)

The experimentation of the newly produced railroad vehicle

○島田 悟, 吉田 淳史, 吉田 崇晃, 山野 孝寛, 鈴木 茂 (田村電機製作所)
[電] 関 純子, [機] 伊東 孝彦 (雪ヶ谷制御研究所)

Satoru SHIMADA, Atsushi YOSHIDA, Takaaki YOSHIDA, Takahiro YAMANO, Shigeru SUZUKI
TAMURA ELECTRIC WORKS, LTD. Shimomeguro2-2-3, Meguro-ku, Tokyo
Sumiko SEKI, Takahiko ITOH, Yukigaya Institute co., ltd. Shinn'yokohama2-12-203 Kouhoku-ku, Yokohama

This paper describes our experimental simulation of the newly produced railroad vehicle.
We produced the railroad vehicle, which has the regenerative brake driven by the new power transmission (FST: Fluid Switching Transmission) without converting electric power.
The vehicle has no electric power train on board, traction and braking power between wheels and flywheel, and between thermal engine and flywheel, are linked together by the FST.
The FST is the new hydraulic transmission with switching control, which makes the power transmission of bilateral and high efficiency possible.
The vehicle has a newly developed flywheel. The flywheel wears three layer of flouting shrouds to reduce the windage loss.

キーワード: 油圧スイッチング制御, 双方向無段油圧変速機, 回生制動, フライホイール
Key Words: Hydraulic-switching control, Bilateral continuance fluid transmission, Regenerative brake, Flywheel

1. はじめに

電力変換を行わないで, 回生制動を可能にした, フライホイール搭載鉄道車両の試作運転を行った。試作車両は, エンジン出力とフライホイールに蓄積されたエネルギーによって走行する。エンジンと車輪, エンジンとフライホイール, 及びフライホイールと車輪との間の動力伝達には, 新たに開発した双方向性の油圧変速機 (FST: Fluid Switching Transmission) ^{(1)~(4)} を使用した。フライホイールには, 新開発の風損低減機能 ^{(5)~(7)} を備えた。これらの新技術を適用し, 鉄道車両のさらなる省エネルギー化を目指す。実証試験のために敷設した試験専用軌道 (ゲージ幅 1,067mm) で, 2003 年 10 月 7 日から実走行を開始したので報告する。

2. 新技術

2-1 FST

FST 方式とは, 制御目標をエネルギーとし, 油圧, 流量を目的に応じて制御するものである。これは電気回路におけるスイッチング制御と等価な理論に基づいた制御方式である。本方式に用いる油圧ポンプ, モータは定容量形であり, 開閉弁の制御を行うことで, 可変容量形ポンプ, モータと等価な動作を実現する。よって双方向性動力伝達機能を有し, 常用変速比変更幅を広くとれる。またエネルギー蓄積装置であるフライホイールと併用することで, 回生制動も可能となる。

以下, FST 方式の動作について記す。
FST の基本的な回路を Fig.1 に, スwitching 電力制御回路を Fig.2 に, 構成素子の機能等価表を Table1 に示す。

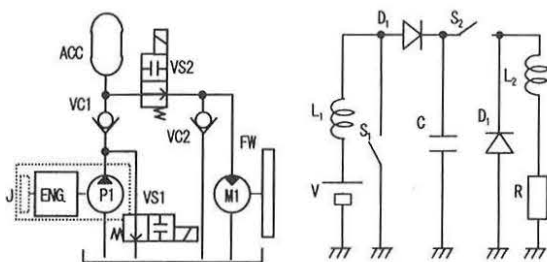


Fig.1 FST hydraulic circuit Fig.2 Electric switching circuit

図中に記載される素子 J について以下に記す。

エンジン ENG 部, 油圧ポンプ P1 部に点線で付加されている J は, エンジンと油圧ポンプの軸回りの慣性モーメントを代表している。システムを構成するにあたり, この慣性モーメントが不足している場合は, 適宜, 所要の値を持ったフライホイールを付加する。

Table1 Equivalent functions

FST Hydraulic circuit	Electric switching circuit
J (Inertia)	L_1
VS1 (Solenoid Valve)	S_1
VC1 (Check Valve)	D_1
ACC (Accumulator)	C
VS2 (Solenoid Valve)	S_2
VC2 (Check Valve)	D_2
FW (Flywheel)	L_2

油圧ポンプ P1 の軸周りの運動方程式を式(1)に, スwitching 電力制御の入力電圧関係式を式(2)に示す。なお, 構成素子は理想化モデルを用いることとする。

$$T_e - T_p - J \cdot d\omega/dt = 0 \quad (1)$$

$$V_{in} - V_c - L_1 \cdot dI/dt = 0 \quad (2)$$

T_e : エンジン軸出力トルク, T_p : 油圧ポンプ軸入力トルク
 J : 駆動系の慣性モーメント, ω : エンジン角速度
 V_{in} : 入力電圧, V_c : C 端子電圧
 L_1 : インダクタンス, I : 電流

次に制御素子状態を表す係数を付加した式を式(1)'(2)'に示す。

$$T_e - T_p \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - J \cdot d\omega/dt = 0 \quad (1)'$$

$$V_{in} - V_c \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - L_1 \cdot dI/dt = 0 \quad (2)'$$

“0”は, VS1 が開 (アンロード), S_1 が ON の場合を意味し, “1”は, VS1 が閉 (ロード), S_1 が OFF の場合を意味す

る。FST 制御としては、 ω があらかじめ設定した回転数に達したら、0.1 を反転させるか、またはクロックにより所定の周波数で、0.1 を反転させることで、スイッチングパワー制御を成立させる。

以上、式(1)(2)が等価な関係であることから、油圧回路においてもスイッチングパワー制御動作が可能と言える。

定容量形ポンプを一定トルク、一定回転で駆動した場合、すなわち入力エネルギー Win 一定で運転した状態において、FST により動力伝達できる変速範囲 PQ 特性と、電気回路における VI 特性を Fig.3 に示す。

FST 制御で、可変容量形ポンプを定馬力制御した場合に相当した動作が可能であることがわかる。

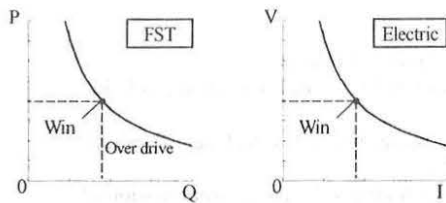


Fig.3 PQ or VI makes hyperbole

2-2 フライホイールの風損低減装置

フライホイールは風損を下げるため、真空中やガス置換された環境下で運転されている。

本低減装置は、フライホイールを浮動シュラウドで覆い、真空を用いずに大幅な風損低減を行っている。

Fig.4 にフライホイールの外面における空気抵抗の状態を示す。

フライホイールの同心上に、 n 層の浮動シュラウドを配置し、このフライホイール外周と各浮動シュラウドを無限平行平板として空気抵抗を考える。定常状態では、力の釣り合い状態から各浮動シュラウドの内外面にはたらく抵抗力は、反対向きで絶対値が等しい。また、流体を挟んだ相手面の抵抗力も、反対向きで絶対値が等しい。よって、全ての面において抵抗力は等しい。

一般に、空気抵抗は式(3)で表されることが知られている。

$$F = A \rho C_d V^2 / 2 \quad (3)$$

A : 代表面積, ρ : 気体密度, C_d : 抵抗係数, V : 速度

各抵抗力は等しいことから式(3)より、各層間の相対速度は同一となり、フライホイールの速度の $1/(n+1)$ に低減される。空気抵抗は速度の二乗に比例することから、フライホイール単体で回転させたときの空気抵抗を F_0 とすると、式(4)が成り立つ。

$$F = F_0 / (n+1)^2 \quad (4)$$

すなわち、 n 層の浮動シュラウドにより、空気抵抗は $1/(n+1)^2$ に低減される。

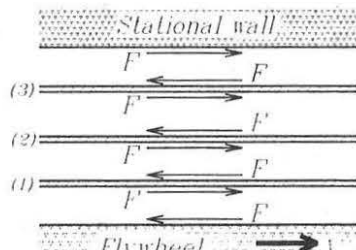


Fig.4 Theoretical model of a Flywheel and Shrouds

本車両に搭載したフライホイールは、浮動シュラウドを 3 層装着している。

Fig.5 に搭載したフライホイールにおける浮動シュラウドの層数をパラメーターとした風損理論値を示した。また、実測したフライホイール単体と 3 層装着したときの値も示している。層数を増やすことにより、風損の大幅な低減が可能であることを示している。

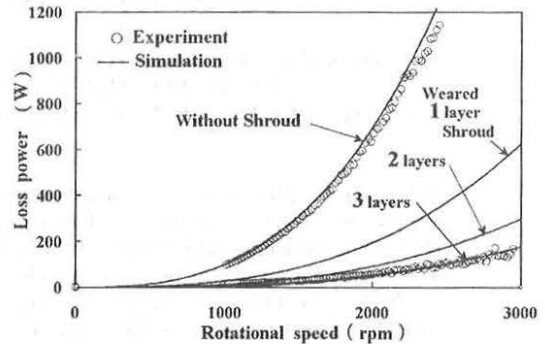


Fig.5 FW windage loss power is changed by number of Shrouds

フライホイールには、軸に油圧ポンプモータが直結されている。また、ジンバル支持構造により、車体傾斜時のジャイロモーメントの発生を防止している。

Fig.6 に、風損低減装置を搭載したフライホイールの主要部分の断面図を示す。

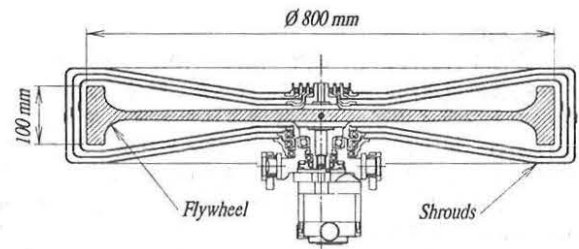


Fig.6 A cross section of the Flywheel and its Shrouds

3. 試作鉄道車両

3-1 車両油圧回路

本車両の油圧回路ブロック図を Fig.7 に、製作した油圧装置の写真を Fig.8 に示す。本回路において FST は、エンジン ENG と駆動車輪 DW の間、エンジンとフライホイール FW の間及び FW と DW の間で、一方または双方向の動力伝達機能を果たす。

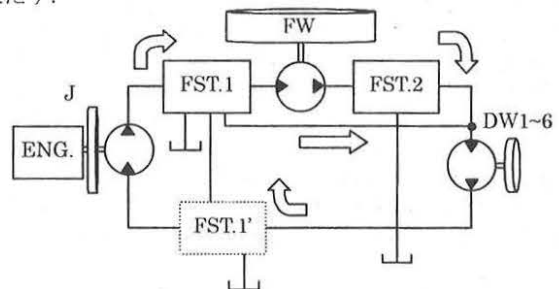


Fig.7 Block diagram of hydraulic control

使用した油圧部品は、定容量形ポンプ、定容量形モータ、開閉弁、逆止弁、アキュムレータ、リリーフ弁であり、すべて汎用品で構成した。実験の客観性を持たせ、再現性を高めるためである。なお、リリーフ弁は安全弁としてのみ機能さ

せる。また、マニホールドを製作して配管構成の簡略化を図り、各種損失の低減を図った。

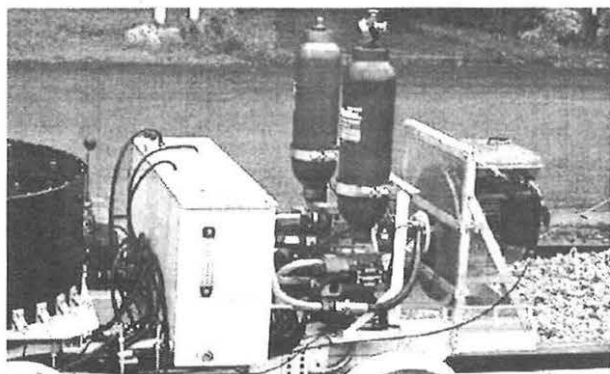


Fig.8 Hydraulic apparatus on board

3-2 車両制御

運転指令は、制御装置のモノレバー操作で入力され、FSTのアルゴリズムに従って開閉弁（VS1~6）が制御される。そして、エンジンを設定回転数範囲内で運転させ、フライホイールは設定回転数を上限とし充放勢され、回生制動可能な車両が運転される。本装置には、車両速度やFWの回転数、圧力、その他情報がセンサから入力され、表示、蓄積される。

3-3 車両諸元

製作した試作車両の写真を Fig.9 に、試作車両のボギー部の設計概略図を Fig.10 に、試作車両の諸元抜粋を Table2 に示す。駆動系は3軸6輪で、軸間距離はそれぞれ1mである。試験軌道の曲率に合わせて自動操舵するステアリングボギーを用いている。

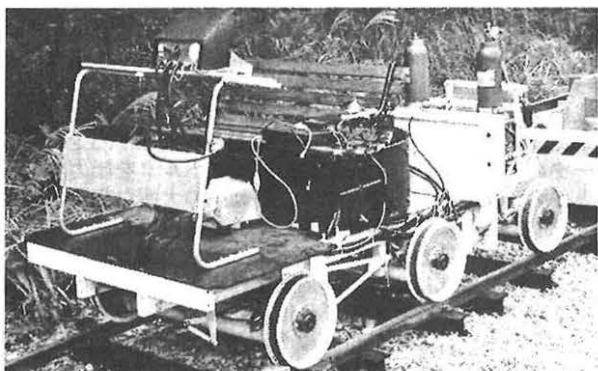


Fig.9 The test vehicle on the rail

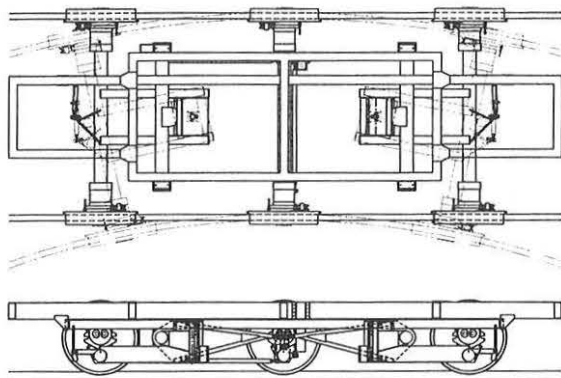


Fig.10 The steering bogie of the test vehicle

Table 2 Specification of the vehicle

Weight/Dimension	970[kg], 3.0m × 1.16m × 0.87(1.19)m
DM : Drive engine	Eh17-2D (Fuji heavy Indust. Corp.) Additional Flywheel Total Inertia: 0.2 [kg·m ²] Rotor : Weight 10[kg], ϕ 0.4[m], Thickness: 0.01[m]
PM : Pump/Motor	YP15-5 / M2A7.5 / M3A15 (Shimadzu Corp.)
VS : Solenoid valve	SS-G03-A3X-R-D2, SNH-G01,03(Fujikoshi)
VC : Check valve	CIT-06 / CRG-03-01 (Yuken Corp.)
ACC : Accumulator	N210-4D (Nippon Accumulator Co.,Ltd.)
Hydraulic fluid	ISO VG32 (Mobil Co.,Ltd.)
Storage Flywheel	Total Inertia: 13.0[kg·m ²] Rotor : Weight 124[kg], ϕ 0.8[m], Height: 0.1[m], Thickness 0.030[m]

4. 試験走行

4-1 試験概要

試験走行する軌道は、ゲージ幅 1067mm, 最大勾配 85‰, 最小曲率半径 5m, 全長 518m の試験専用軌道である。試験走行は、下記の3つのモードで行う。

- ・ エンジン単独出力による走行
- ・ フライホイール単独出力による走行
- ・ エンジンとフライホイール出力による走行

なお、エンジンとフライホイール出力による試験は、現在準備段階である。

4-2 エンジン単独出力走行

エンジン単独出力で、試験軌道を走行する試験を行った。運転指令は、搭乗した運転手1名のモノレバー操作により入力した。データを Fig.11 に示す。なお、()内は、図中の表示を示す。図中データは、エンジン回転数(Engine), 車両速度(Velocity), 制御圧力値(Acc1), 運転指令(Acceleration/Deceleration), 開閉弁の状態(VS1,2,5,6 パルス波形 H レベル: 閉, L レベル: 開)を示している。

本データは、調整運転段階の走行試験結果である。力行時の速度設定は2段階で 5km/h, 10km/h 一定とし、結果も設定通りの速度制御が行えることを確認した。図中 VS 部の開閉状況は、FST 制御ループが、速度、軌道状況に応じて正常に応じ、開閉制御できていることを示している。ただし、登坂、降坂勾配が大きい部分を通過する際、設定速度からの逸脱が見られるが、さらに正確に応答すべく、加速圧力、減速圧力の設定値の適正化が求められる。

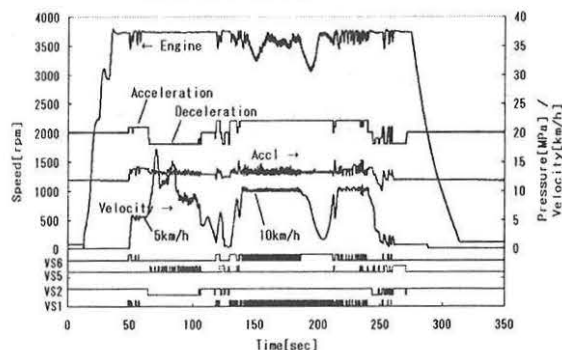


Fig.11 Log data, driven by the engine

4-3 フライホイール単独出力走行

フライホイールをエンジン出力により 3000rpm まで充勢し、その後エンジンを停止させ、フライホイールに蓄積されたエネルギーのみで車両を走行させる試験を行った。

フライホイール充勢のデータを Fig.12 に示す。データは、フライホイールが 0~3000rpm まで充勢されている間、エンジンは 3500rpm 付近の一定回転数で制御されていることを示している。本エンジンの軸出力トルクで駆動される油圧ポンプの駆動圧力は約 8MPa であるが、FST により設定した 15MPa の高圧まで昇圧され、その圧力で FW を加速していることを示している。

流量の関係についても説明する。エンジン部に使用した定容量形ポンプは押しのけ容積が 5.1cc/rev であり、この場合吐出油量は 17.85L/min となる。フライホイール部の定容量形モータは 7.5cc/rev なので、流入油量は 0~22.56L/min となる。すなわち、フライホイールが低回転時には高圧で、高回転時は低圧で充勢されており、変速機としての機能を果たしていることがわかる。

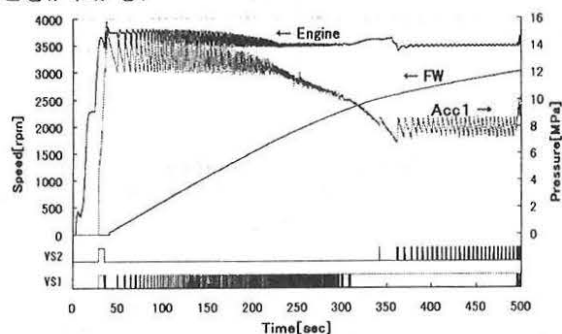


Fig.12 Log data on the acceleration of the flywheel

エンジン停止後、フライホイールに蓄積されたエネルギーにより車両を走行させる試験を行った。データを Fig.13 に示す。本試験では、運転手が運転指令を与えながら、試験軌道を 2 周走行した。

試験結果から、フライホイール回転数が変動しても、一定速度運転制御できること、回生制動でフライホイールが充勢することを確認した。

A,B 点で 5km/h, 10km/h 定速度運転制御ができていることが判る。C,D 点では回生制動制御によりフライホイールを再加速していることが判る。C 点(10→5km/h)における回生率は減速度 1.2km/h/s で約 35%であった。

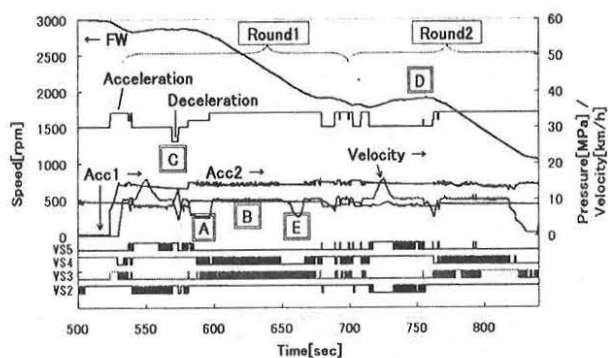


Fig.13 Log data, driven by the flywheel

5. 考察

試験軌道の勾配、摩擦力等による走行抵抗による損失、FST を構成する油圧素子の効率等を考慮した走行シミュレーションを試験に先立って行った。フライホイール単独出力による走行モードのシミュレーション結果を Fig.14 に示す。

このシミュレーションは、試験軌道を 1 周走行後に回生制動で停車させる条件とした。車両の走行速度は最大 10km/h、加速圧力は図中 Acc2 が示す通り 14MPa とした。

制動圧力は 13~16MPa とし、平均減速度は約 3km/h/s である。この場合の回生効率約 70%となる。なお、図中の VS2~5 は FST 制御アルゴリズムに基づいて開閉弁を制御している状態を示している。

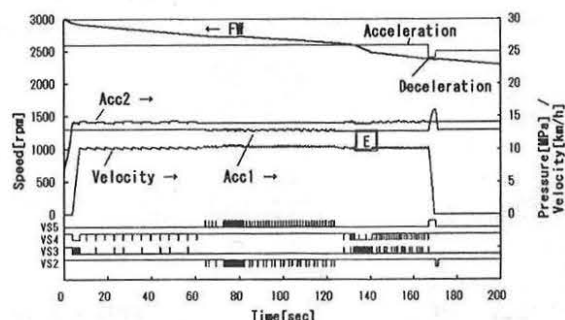


Fig.14 Simulation output, driven by the flywheel

ここで、実際に走行した試験結果 Fig.13 と比較する。大きく異なる点は、運転指令値(Acceleration/Deceleration)の入力値であるが、同一指令値でありながら実測データで 10km/h を維持できていない部分がある(図中 E 点)。原因は、勾配抵抗、摩擦抵抗等がシミュレーションで設定した値と異なっていることが推定される。

今回は、エンジン単独出力による走行、フライホイール単独出力による試験走行を行った。これらの結果から試験軌道の勾配情報、走行抵抗値等を加味し、制御方法の改善を行い、エンジン、フライホイールのハイブリッドシステムとしての走行試験に移行していく。

6. おわりに

本試験車両の動力伝達方式には、FST という新しい油圧無段階変速トランスミッションを採用した。

この技術により、エンジン、エネルギー蓄積用フライホイール、及び車輪との間の動力伝達を電力に変換することなく行って、走行、回生制動ができることを確認した。これらは、新しいコンセプトの鉄道車両として展開する可能性を持つ。

また、同一出力の油圧モータと電動機を比較すると、油圧モータの方が軽く、広い回転数範囲で高トルクを出力できることから、減速機も不要であり、駆動系の大幅な軽量化が可能となり、さらに変速範囲も広いことから、ガスタービン等の導入等も視野に入れた検討も行えることとなる。

以上、FST 方式によれば、気動車の駆動系を抜本的に改良することとなり、省エネルギー化を大幅に進めることになる。今後は試験走行を繰り返してデータを蓄積し、早期の新型省エネルギー車両の商用化を目指して行く。

参考文献

- (1) 伊東・他 4 名：油圧制御に於ける新理論の提案, H14 春季フルード・パワーシステム講演論文集, p34
- (2) 鈴木・他 4 名：油圧制御に於ける新方式の試作・実験報告, H14 春季フルード・パワーシステム講演論文集, p37
- (3) 伊東・他 2 名：油圧制御に於ける新理論と実験報告(第 2 報告), 山梨講演会論文集, p243
- (4) 伊東：油空圧制御における新理論の構築, 油空圧技術, 518, Vol142, No. 5, p49
- (5) 青山・他 3 名：電力貯蔵用フライホイール, 第 8 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, p365
- (6) 伊東・関：浮動シュラウドを用いて流体抵抗を低減した超音速フライホイールの実験報告, D&D2003, No.222
- (7) 関・伊東：高速フライホイールの空気抵抗低減に関する真空シュラウドと浮動シュラウドの比較, D&D2003, No. 634