

鉄道台車ピッチングと電動機直列・並列接続に着眼した電気車の牽引力向上の研究

～1/8.4 試験用モデル車両による台車ピッチング再現試験に基づいて～

○高根沢 真 渡邊 剛史

上野 貴博 市橋 重勝 森田 登

(日本工業大学)

Research of the improvement in hauling force for an electric rolling stock which relation
perceived railway traction pitching and series or parallel connection of electric motor
～ for traction pitching reproduction experiment
by 1/8.4scale test model electric rolling stock ～

○Makoto Takanezawa, Takeshi Watanabe

Takahiro Ueno, Shigekatu Ichihashi, Noboru Morita
(Nippon Institute of Technology)

Research is relation to improve in hauling force for electric rolling stock. Latest inverter rolling stock is apprehensive by hauling force effect which means, constitution shifted into parallel connection from series connection of electric motor. This experiment reproduced for traction pitching of electro-mechanical coupled by test model electric rolling stock. In this paper, relational issue to the problem considered for reproduction experiment of traction pitching and tangential force coefficient.

キーワード：牽引力, 電動機並列接続, 台車ピッチング, 接線力係数, 電気-機械系連成

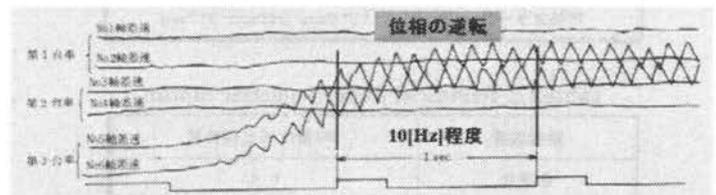
Key Words : hauling force, electric motor parallel connection, traction pitching, tangential force coefficient
electro-mechanical coupled

1. 技術的背景⁽¹⁾⁽⁵⁾

戦後から今日にかけ、電気車両は蒸気機関車に替わり目覚ましい発展を遂げて来た。そして、車両性能の向上は高速度化を実現し、人々の鉄道への関心は一層高まり、社会的貢献度も高い。このため、鉄道技術として更なる技術の向上と安全性・安定性の向上が求められており、更にはコストダウンと性能アップの両面におけるコストパフォーマンスが求められている。

牽引力の向上が永遠の命題である電気車において、牽引力を妨げるものにボギー台車のピッチングがある。そこで、過去の事例から整理すると、電動機並列接続において特に、台車ピッチング、軸重移動が顕著に生じていることを参考文献(1)において報告した。

本報告では、電動機並列接続に着眼した経緯から、1/8.4スケール試験用モデル車両を開発し、並列接続時の台車ピッチングの再現実証を図り、さらに、電動機直列接続時における基礎特性を一部計測出来たので、計測結果に基づく接線力係数を整理した一例をここに報告する。

Fig1.1 Longitudinal Axis Alternate Slipping of EF80⁽³⁾2. 試験用モデル車両の導入⁽⁴⁾

開発した試験用モデル車両の外観を Fig2.1 に示す。車両構成は、駆動車両と制御車両の 2 両に分けて開発した。駆動車両はバッテリー駆動とし、前台車 2 軸駆動としている。また軸重を可変的に調整の出来る構成を採用している。

台車の外観を Fig2.2 に示す。台車構造は、枕バネ支持構造とし、枕バネにはシリコンゴムを採用し、振り剛性を期待している。軸バネはスプリングバネを採用し、軸バネ周波数成分が実車に相当する値を設計している。

駆動車両、電動機、台車、制御車両の仕様をそれぞれ Table2.1, Table2.2, Table2.3, Table2.4 に示す。



Fig2.1 1/8.4scale test model of electric rolling stock

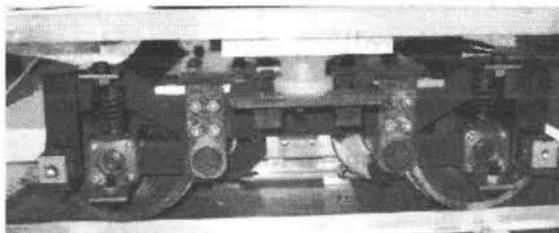


Fig2.2 Test model of driving traction

Table2.1 Technical data of driving rolling stock

車両質量(ウェイト含み)	86.5 kg (一軸重 270N)
台車質量	13.0 kg
車体支持方式	まくらバネ支持(シリコンゴム)
レール・連結器高さ距離	80mm
両端台車中心間距離	630mm
車体スケール	1310mm-340mm-317mm

Table2.2 Technical data of electric motor

駆動装置	つり掛け式支持装置
歯車比	1:4
主電動機	DCモータ(分巻)
定格	100W-24V-5A-2500rpm-3.2m/s
実車換算速度	100 km/h

Table2.3 Technical data of driving traction

軸間距離	250 mm
車輪径	102.4 mm
牽引点伝達高さ(レール面間)	65mm / 45mm (可変方式)
軸バネ定数	56.89 N/mm

Table2.4 Technical data of control rolling stock

車両スケール	2000mm-529mm-407mm
車両質量	141.4 kg
制御方式	PLC方式(電圧/速度フィードバック) -抵抗制御方式切替

3. 接線力係数の導入⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

本章において、実験により実測される車両走行速度から計算出来る接線力係数の導出法を示す。

3.1 補正係数

試験用モデル車両の駆動用後台車からの逆起電力を測定し、電圧値から補正し電動機回転数を算出する。ここで、計測上の機器条件から補正係数を 250 に設定する。

3.2 走行速度

3.1 の補正により、電圧値から電動機回転数を得た。ここで、電動機回転数から動輪走行速度へ変換する。以下に変換式を示す。

$$v = \frac{60\pi \cdot D \cdot n}{1000 \cdot G} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

v : 動輪走行速度 D : 動輪直径 n : 電動機回転数
G : 歯数比

3.3 動輪周引張力

次に 3.2 で得た動輪走行速度と各種機器の特性条件から、動輪周引張力を算出する。以下に変換式を示す。

$$\tau_d = 0.367 \frac{E_t \cdot I_m \cdot m}{v} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

τ_d : 動輪周引張力 E_t : 端子間電圧
 I_m : 主電動機電流 m : 電動機個数

3.4 接線力係数(2)

以上のパラメータを同定することにより、接線力係数は以下の式から求められる。

$$\mu_s = \frac{\tau_d - M \frac{dv}{dt}}{P \cdot g} \times 100[\%] \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 μ_s : 接線力係数 M : 牽引総重量 P : 軸重
g : 重力加速度

4. 試験法概要

Fig4.1 に示すような勾配試験装置により、25%勾配条件を決定し試験を行った。ここで、25%勾配に設定したのは牽引定数を決める際に、一種目安となる勾配条件としたためである。さらには、台車ピッチングに関する過去の事例からも 25%勾配においての報告が確認出来ており、その再現性の実証も兼ねている。

試験は電圧フィードバック制御 5 ノッチ(最大力行)条件にて、勾配 25%始動時から動輪の動きだし帯域に絞り測定を行った。測定項目は、加速度センサ/動ひずみゲージを用いた変位測定、並列接続時における電動機分担電流およびトータル電流、動輪の回転速度を同時測定する。加速度センサの取付け位置は Fig4.2 に示す。1ch-2ch において台車のピッチング方向の変位を測定、さらに 1ch-3ch において捻り剛性のモード存在有無を確認するためのものである。

さらに、直列接続時においても同様に加速度センサ/動ひずみゲージを用いた変位測定、電動機分担電圧および主電動機電流、動輪の回転速度を同時測定する。

Fig4.3 に試験構成回路を示す。試験条件として雰囲気は Dry 条件とし、屋内での試験を行った。軸重は一軸 16.8ton の実車に相当する条件を構成した。各種試験条件を Table4.1 に示す。

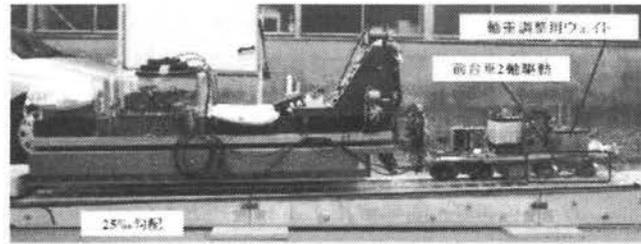


Fig4.1 Gradient test system in 25%

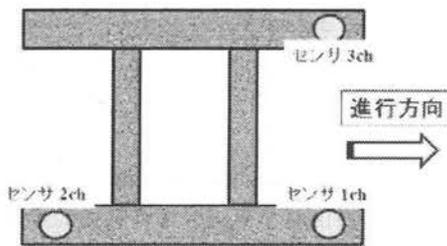


Fig4.2 sensor installation position of driving traction

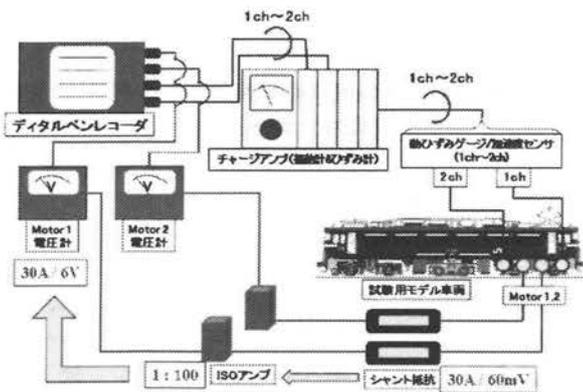


Fig4.3 Test component circuit / parallel connection

Table4.1 Test condition

測定項目	接続方式	軸重 (調整用ウェイト含み)	牽引重量	制御条件	レール面	雰囲気条件 (温度/湿度)
加速度センサ測定	並列	54kg	381.4kg	電圧フィードバック	Dry	20℃ / 85% (雨天)
	直列	54kg	381.4kg	電圧フィードバック	Dry	24℃ / 68% (晴天)
動ひずみゲージ測定	並列	54kg	381.4kg	電圧フィードバック	Dry	22℃ / 74% (晴天)
	直列	54kg	381.4kg	電圧フィードバック	Dry	22℃ / 74% (晴天)

5. 試験結果一例

本章では勾配試験の結果を Fig5.1, Fig5.2 に加速度センサによる試験結果を示し、Fig5.3, Fig5.4 には動ひずみゲージによる試験結果を示す。動ひずみゲージでは、ひずみ値が正の時、バネ変位の縮み方向を表わし、ひずみ値が負の時、バネ変位の伸び方向を表わす。また本試験では、停止状態から最大ノッチで力行、牽引した時の結果である。

Fig5.1 では並列接続時の分担電流と振動変位の様子を表わしている。また、Fig5.2 は分担電圧と振動変位の様子を表わしている。

Fig5.3 の動ひずみゲージによる並列接続時の結果では、分担電流が電流変動±2A 程度を生じ、5Hz 程度の逆位相状態が確認できる。同様に振動変位においても、ミクロな視点では 5Hz 程度の逆位相に近い状態、つまりはピッチング現象の傾向が確認できる。さらに着目すべきはマクロな視点において、1ch-2ch の変位から台車は 700μm 程度の軸重移動を生じさせ、前傾姿勢になった後、動き出している様子が確認できる。

Fig5.4 の直列接続時の結果では、分担電圧が電圧変動±0.4V 程度生じ、5Hz 程度の逆位相が確認できる。一方、振動変位の様子は、並列接続時同様、始動時に前傾姿勢への軸重移動は生じるものの、変位波形は同位相でピッチングの傾向は確認できない。

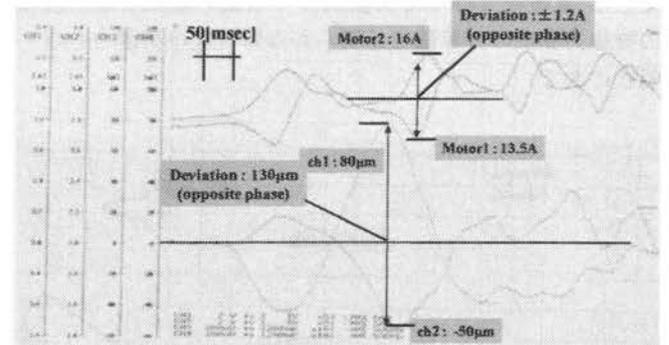


Fig5.1 Parallel connection test result

(acceleration sensor)

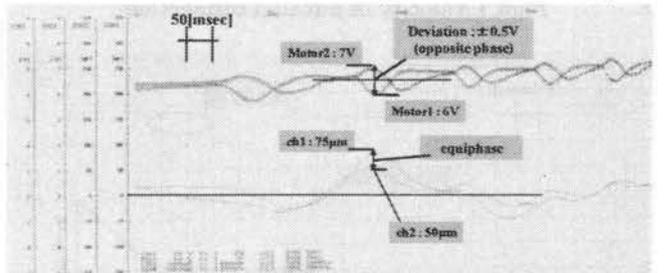


Fig5.2 Series connection test result

(acceleration sensor)

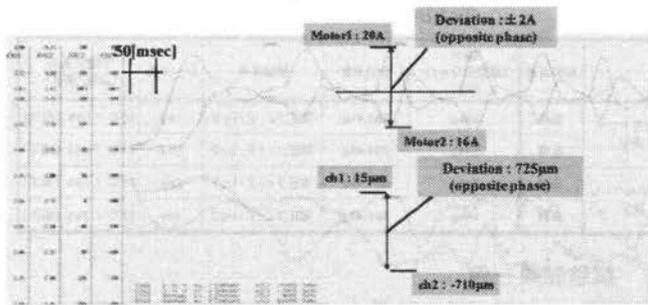


Fig5.3 Parallel connection test result
(Dynamic analysis strain gauge)

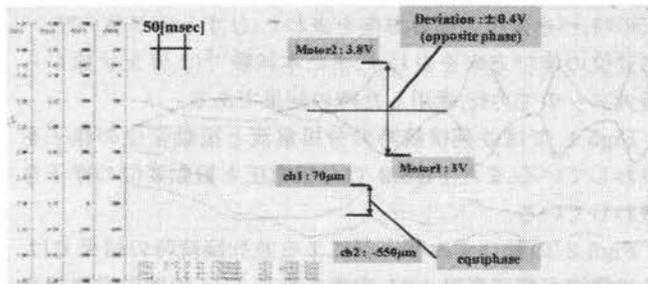


Fig5.4 Series connection test result
(Dynamic analysis strain gauge)

6. 考察の一例

Fig6.1 に並列接続時の走行速度を示し, Fig6.2 に直列接続時における走行速度の試験結果を示す。

直列接続時の速度勾配の傾きは, 並列接続時に比べ 15% 程度高いことが確認できる。また, 本報告 3 章に記した接線力係数をこの実験結果から算出すると, Table6.1 のような結果が得られる。この結果からすると, 接線力係数は並列接続時と直列接続とでは, ともに同様の値であることが確認できる。本報告で行った実験条件では並列接続と直列接続の接線力係数の計算値では明らかな特性差は確認されない現状にある。

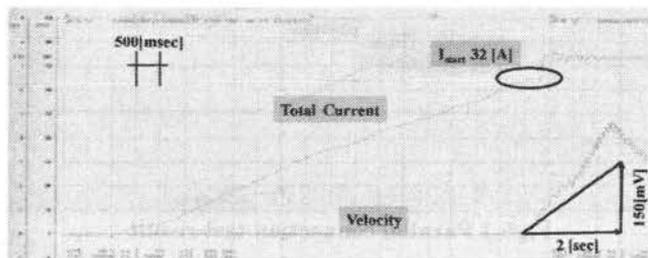


Fig6.1 Velocity of parallel connection

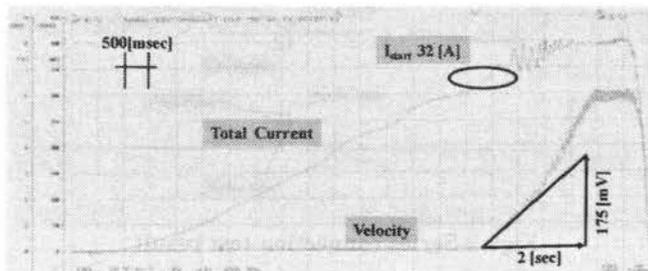


Fig6.2 Velocity of series connection

Table6.1 Calculation of tangential force coefficient

	接続方式	重量 (調整用ウェイト 込み)	牽引重量	制御条件	接線力係数
動りすみゲージ 測定 (レール面/Dry)	並列	54kg	381.4kg	電圧フィードバック	26.2%
	直列	54kg	381.4kg	電圧フィードバック	25.3%

7. 終わりに

本研究では, 電動機接続方式が牽引特性に与える影響を調査するため, 1/8.4 スケール試験用モデル車両を開発し, 試験を行った。今回の結果からは以下のことが考察される。

- (1) 電動機並列接続方式において, 始動時における並列の 2 電動機の交互分担変動が生じ, 同時に軸バネのたわみ量から見た動輪荷重についても交互分担変動が確認できた。この時, 交互変動の位相を見ると電流も荷重分担も互いに逆位相であることが確認できた。したがって, 電気-機械連成の台車ピッチング現象を再現・確認できた。
- (2) 電動機直列接続方式では, 分担電圧の逆位相関係は確認したもの, 振動変位すなわち, 動輪荷重の逆位相関係は生じず, 同位相であった。すなわち, 台車ピッチングは生じない事が確認できた。
- (3) 本試験モデル車両では電動機接続の並列/直列に関係なく, 電動機トルクの増加に従って, 徐々に台車全体は前傾姿勢を取る傾向が見られた。
- (4) 今回の実験では, 速度勾配から算出した接線力係数(粘着係数)は, 直列接続/並列接続ともに同様の値であった。

今後の展開として, 電動機接続方式による特性差を顕著に確認するため, 牽引重量を粘着限界にまで設定し, レール/動輪間の雰囲気条件をパラメータとして実験を展開する。

参考文献

- 1) 高根沢真, 森田登: 車両台車の歴史的変遷を考慮した牽引力に関わる台車ピッチング現象の電気系-機械系連成解析における取組の一方, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2007。
- 2) 山下道寛, 南秀樹, 渡邊朝紀, 秦広, 西重樹, 西澤寛, 中川哲朗: EF510 電気機関車の軸重移動とその補償, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2002。
- 3) 川添雄司: 「交流電気車両要論」, 電気車研究会, 初版 pp.5-12, 57, 87-90, 94, 1971。
- 4) 日本機械学会: 「鉄道車両のダイナミクス」, 第 2 版 pp.13-14, 126-235, 1996
- 5) 福崎直治, 沢野周一: 「電車と電気機関車」, 岩波書店, 第 2 版, 1964。
- 6) 沖島喜八: 「鉄道車両特論」, 交友社, 初版, pp.141-163, 1977。
- 7) 電気学会: 「電気鉄道ハンドブック」, 第 5 版, 1968。