

様々な路面条件下での超過角運動量に着目した空転再粘着制御

学生員 原 崇文* 正員 古関 隆章 (東京大)*

Re-adhesion control by monitoring excessive angular momentum in electric railway traction

Takafumi Hara*, Student Member, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)*, Member

1. はじめに

空転が生じると、エネルギー散逸や乗り心地の悪化、線路の破損が生じてしまうため、粘着状態に戻すため空転再粘着制御が必要である。筆者らはこの空転再粘着制御に関して、空転の重度を測る「超過トルク」および「超過角運動量」を提案した⁽¹⁾。

接線力係数 - すべり速度の関係特性は一般には一様ではなく、多様なパターンが存在する⁽²⁾。本検討では先行研究⁽¹⁾とは異なった路面状況を使用して数値解析を行い、そのときの挙動の変化を見る。

2. 超過角運動量に着目した空転再粘着制御法⁽¹⁾

超過トルクとは空転したときに差分が生じるモータトルク ($G_r T_m$) と接線力トルク ($(1 + \frac{J_R}{J}) T_L$) の差分である。接線力トルクについては外乱オブザーバを使用して推定する。この超過トルクを積分したものが超過角運動量であり、これを空転再粘着制御に生かすことで以下のような利点が挙げられる。

- (1) わざと決まった時間 (τ_1 , Fig. 1), 空転をさせ接線力トルクなどの情報を得ることで、誤ったトルク引き下げ、引き上げをすることなく、再粘着できる。
- (2) 超過角運動量の補償よりいつ再粘着するかわかる。
- (3) 超過トルク T_{ex} の計算の簡易化により超過角運動量 L_{ex} を求められる。

本検討で使用する超過角運動量に着目した空転再粘着制御を Fig. 1 に示す。

3. 数値解析モデル

本検討では1車体と1動軸に簡単化した1軸換算モデルを用いる。1軸換算モデルとは、1車体と1動軸のモデルに簡単化することによって、軸重移動や連結器の影響を考慮することはできないものの、制御方式の利点や欠点を求めることが比較的容易に行うことが可能であるモデルである。これを Fig. 2 に示す。

路面状況については Fig. 3 に示す4つの接線力係数 - すべり速度の関係曲線を使用する。ケーススタディにおいて Fig. 3 に示す接線力係数 - すべり速度の関係曲線での

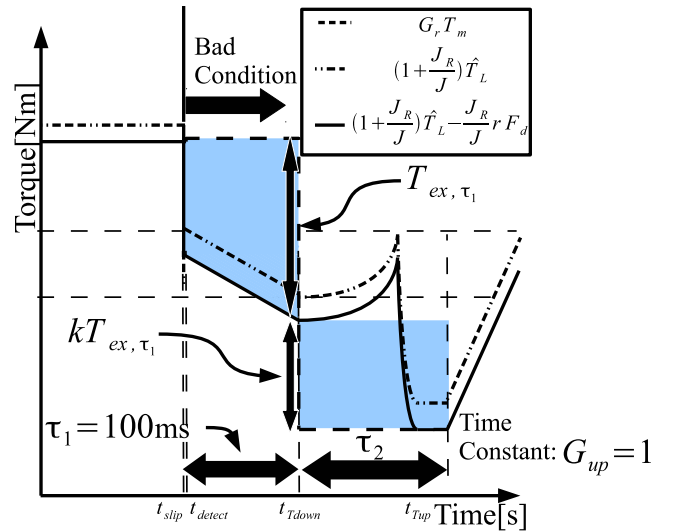


Fig. 1. Re-adhesion control by monitoring excessive angular momentum⁽¹⁾

Table 1. Rail condition change

Case A	(a) → (b)
Case B	(c) → (d)

ように変化させたかを Table 1 に示す。これらの路面状況の変化は「良い粘着状態」から「悪い粘着状態」になるようにした。ここで、Case A の2つの曲線 (a), (b) について先行研究⁽¹⁾において使用していた接線力係数 - すべり速度の関係曲線である。先行研究 (Case A) においては接線力係数 - すべり速度の関係曲線の頂点がすべり速度が小さい位置で設定され、すべり速度が大きい領域では接線力係数が低下しないものを仮定していた。一方、今回新しく設定した接線力係数 - すべり速度の関係曲線 (c), (d) は頂点をすべり速度の大きい領域に設定し、頂点の形状を急峻にした。

数値解析のシナリオを Table 2 に示す。計算環境は MATLAB/Simulink を利用した。最低出力トルク $T_{min} = 10.0$ とした。また、勾配は空転が起きやすいよう、登り 30.0 % (1000 m 進んで 30 m 登る勾配) とした。

評価指標としては「粘着利用率⁽³⁾」と「動輪周損失摩擦力⁽¹⁾」の2つを使用する。粘着力の有効利用とレール、車

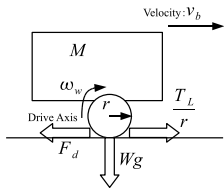


Fig. 2. Single axis bogie model

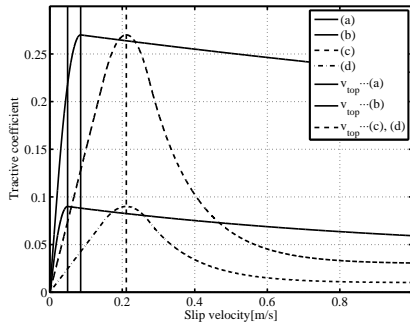


Fig. 3. Relation between tractive coefficient and slip velocity

Table 2. Case study scenario

Time [s]	Simulation
0	Acceleration starts. $T_m = 1000$ [N·m] Rail condition (a), (c)
6	Rail condition gets worse. (a) (b), (c) (d)
15	Rail condition gets better. (b) (a), (d) (c)
24	Simulation stops.
	(a)&(c) ...Good condition, (b)&(d) ...Bad condition

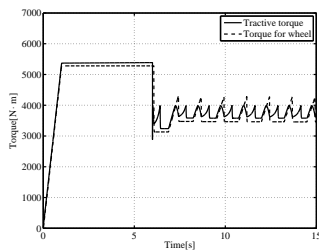


Fig. 4. Motor torque and adhesive torque (Case A)

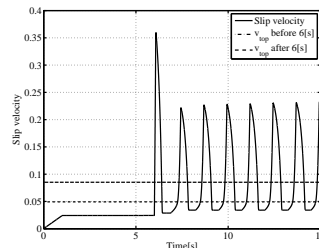


Fig. 5. Slip velocity (Case A)

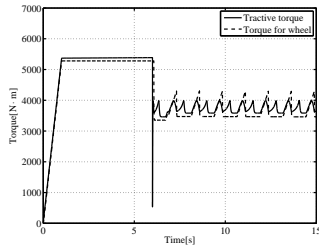


Fig. 6. Motor torque and adhesive torque (Case B)

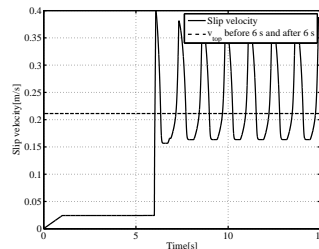


Fig. 7. Slip velocity (Case B)

輪の傷みを評価する 2 つの評価を使用し、粘着利用率が高く、動輪周損失摩擦力が小さいものが「良い空転再粘着制御」として評価する。

4. 数値解析に基づく粘着性能評価

Fig. 4, 5 に Case A における数値解析結果を、Fig. 6, 7 に Case B における数値解析結果を示す。共に高粘着利用率を狙い、空転再粘着を繰り返していることが確認できる。また、Fig. 7 のすべり速度を見ると、接線力係数 - すべり速度の頂点を狙い、モータトルクを制御できている。すべり速度も発散していない。

以上の結果を 3 に基づき、定量的に評価する。2 つのケー

スにおいて粘着利用率と動輪周損失摩擦力を計算した。これを Table 3 に示す。粘着利用率は接線力係数 - すべり速度の関係特性を変化させた Case B は 93.4 % という高い値を示し、路面状況の変化に追従していることが確認できる。動輪周損失摩擦力は Case B の方が約 2.44 倍高くなった。これは Fig. 3 を見てわかるように Case B の接線力係数 - すべり速度の関係特性 (c), (d) の方がすべり速度が高い領域に頂点があり安定状態になっているためである。

以上より、超過角運動量に着目した空転再粘着制御は先行研究⁽¹⁾とは異なった路面状況でも変化に追従し、高粘着利用率を保つことが確認できており、「良い再粘着制御」ができていくことがわかる。

Table 3. Normalized average tractive coefficient and loss friction force around driving wheel

Method	Normalized average tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$	Loss friction force around driving wheel F_{slip}
Case A	92.7	155
Case B	93.4	378

5. まとめと今後の課題

本検討では先行研究⁽¹⁾と異なる路面条件下での超過角運動量に着目した空転再粘着制御の挙動を見た。先行研究においては接線力係数 - すべり速度の関係曲線の頂点がすべり速度が小さい位置で設定され、すべり速度が大きい領域では接線力係数が低下しないものを仮定していた。しかし、電気鉄道において接線力係数 - すべり速度の関係特性は様ではなく、多様なパターンが存在する。そのため、接線力係数 - すべり速度の関係曲線の頂点をすべり速度の大きい領域に設定し、頂点の形状を急峻にすることで、頂点を狙うのが難しいものとした。この路面状況に対しても超過角運動量に着目した空転再粘着制御は変化に追従することが確認できた。

今後の課題は超過角運動量に着目した空転再粘着制御の並列誘導機駆動や台車振動を取り込んだ 4 軸 2 台車モデルへの拡張である。

文 献

- (1) 原 崇文, 槻木澤 佑公, 古閑 隆章:「電気鉄道車両の超過角運動量に基づく再粘着制御の提案とその性能評価」, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, 2011 Annual Conference of IEEJ. Industry Applications Society, Okinawa, Sep 6th -8th.
- (2) 鉄道システムにおける粘着制御技術調査専門委員会:「鉄道車両における粘着制御技術」, 電気学会技術報告, No. 673 (1998)
- (3) 門脇悟志, 大石潔, 宮下一郎, 保川忍:「外乱オブザーバと速度センサレスベクトル制御による電気車 (2M1C) の空転再粘着制御の方式」, 電学論 D, 121, 11, pp.1192.1198 (2001-11)