

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

学生員 原 崇文*

正員 古関 隆章 (東京大)*

非会員 槻木澤 佑公 (住友金属)**

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

Takafumi Hara*, Student Member, Takafumi Koseki*, Member, Yutaka Tsukinokizawa**, Non-member

Abstract Suppression of a slip and reduction of a friction between rail and wheel are important in railway systems. This paper proposes a new slip re-adhesion control based on excessive torque and excessive angular momentum. The effectiveness of the proposed method has been confirmed by the calculation. Furthermore, the proposed method has been evaluated by two performance indicator, frictional force reduction and effective utilization of adhesive force. As a result, it has been found that effective use of adhesive force is achieved and frictional force can be reduced up to 21% by the proposed method.

キーワード: 空転 すべり速度 接線力 電気鉄道 粘着制御 超過角運動量

Keywords: slip slip velocity tractive force electric railway adhesion control excessive angular momentum

1. はじめに

近年、地球の環境に対する意識から、環境負荷の小さい電気鉄道に注目が集まっている。電気鉄道は加速を行うときに伝えられる力である接線力が小さい。そのため、雨が降っている場合や枯れ葉がレールの上に落ちている場合は線路と車輪との間の摩擦力が減少し、空転と呼ばれる、車輪が一周分回転しても、車体が一周分進まない現象が起きる。一旦空転が生じると、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。そのため、車輪と線路が粘着していない空転状態から再び車輪と線路が粘着している粘着状態に戻して加速させる空転再粘着制御が必要である。

空転再粘着制御には、これまで様々な手法が考案されている⁽¹⁾。最近では外乱オブザーバを用いて接線力トルクを外乱とみなしてそれを推定する手法に基づいた空転再粘着制御が開発され⁽²⁾⁽³⁾、実用化されている⁽⁴⁾。しかし、それらの手法は晩秋のレール上への落葉や冬季のレールへの積雪、着氷などによる極めて接線力係数の低い条件下⁽⁵⁾における再粘着の保障についての議論はなされていなく、いつ空転が収束するかやどれくらいモータトルクを絞るかは統計だった考え方に基いて行われていない。

そこで、本論文では空転の重度を測る超過トルクおよび超過角運動量という2つの新しい概念を使用し、極めて劣悪な路面条件において再粘着を保證する再粘着制御について述べる。数値解析によってそれらが可能であることを示す。その再粘着制御を粘着力の有効利用とレール、車輪の傷みという2つの評価指標に基づき評価する。また、従来

再粘着制御⁽⁶⁾と比較を行い、提案再粘着制御の優位性を示す。

2. 提案空転再粘着制御の構成

2.1 超過トルクと超過角運動量 本節では提案空転再粘着制御で必要となる超過トルクおよび超過角運動量の定義を運動方程式より算出する。1車体1動輪に簡略化した電気車の運動方程式を式(1)~(4)に示す。

$$J_R \dot{\omega}_w = G_r T_m - T_L \dots\dots\dots (1)$$

$$M \dot{v}_b = \frac{T_L}{r} - F_d \dots\dots\dots (2)$$

$$v_s = r\omega_w - v_b \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega_s = \omega_w - \frac{v_b}{r} \dots\dots\dots (4)$$

今回用いる各定数について Table 1 に示す。以下では回転系に変換して議論を行う。電気鉄道車両の車体を直方体、車輪を円盤として仮定して質量から慣性モーメント ($J_R = \frac{1}{4} M_R r^2$, $J = \frac{1}{2} M r^2$) を計算する。この関係を用いた式(1)を J_R で除したもから式(2)を rM で除したものを引くと、すべり角速度の微分値 $\dot{\omega}_s$ は式(5)となる。

$$\dot{\omega}_s = \frac{1}{J_R} \left\{ G_r T_m - \left(1 + \frac{J_R}{J} \right) T_L + \frac{J_R}{J} r F_d \right\} \quad (5)$$

すべり角速度はモータトルクおよび接線力トルク、外乱力トルクに依存する。また、すべり角速度の増大によって空転が拡大すると考えられる。

そこで、超過トルクを式(6)のように定義する。

Table 1. Parameters explanation

Item	Value	Comment
J_R	Inertia moment around wheel	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J	Equivalent inertia moment of drive axis	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
ω_w	Driving wheel angular velocity	rad/s
G_r	Gear ratio	-
M_R	Equivalent inertia weight around wheel	kg
M	Mass per axis	kg
v_b	Velocity	rad/s
v_s	Slip velocity	m/s
ω_s	Slip angular velocity	m/s
T_m	Motor torque	N·m
T_L	Adhesive torque	N·m
r	Radius of wheel	m
F_d	Travel resistance	N

$$T_{ex} = J_R \dot{\omega}_s$$

$$= G_r T_m - \left(1 + \frac{J_R}{J}\right) T_L + \frac{J_R}{J} r F_d \dots \dots (6)$$

超過トルクはモータトルク $G_r T_m$ と接線カトルク $(1 + \frac{J_R}{J}) T_L$ の差で、車輪の回転に寄与しない空回りさせるトルクである。

さらにこの超過トルクの積分値を超過角運動量として式(7)と定義する。

$$L_{ex} = \int \left\{ G_r T_m - \left(1 + \frac{J_R}{J}\right) T_L + \frac{J_R}{J} r F_d \right\} dt (7)$$

よって、超過トルク、超過角運動量を使用すると、差すべり角速度およびすべり角速度の微分値は式(8)、(9)のように書き換えられる。

$$\Delta \omega_s = \frac{1}{J_R} \int L_{ex} dt \dots \dots (8)$$

$$\dot{\omega}_s = \frac{1}{J_R} T_{ex} \dots \dots (9)$$

よって、差すべり角速度およびすべり角速度の微分値はそれぞれ超過角運動量、超過トルクに比例することがわかる。空転をすばやく収束させ再粘着を可能にするためには超過角運動量をできるだけ小さくする必要がある。超過角運動量を見ることで、再空転の誘発の防止や空転の程度の大きさの推定ができると考えられる。Fig. 1を見ると、超過角運動量が0になり空転が収束していることが確認される。

2.2 接線カトルクの推定 前節で述べた超過角運動量 L_{ex} および超過トルク T_{ex} の算出に際して、接線カトルクを軸への負荷トルク T_L として推定する必要がある。

よって、式(10)によって構成される同一次元オブザーバを用いて、接線カトルク T_L 、および接線カトルクの微分値 \dot{T}_L の推定を行う。接線カトルクおよび接線カトルク微分値の推定は車輪角速度、入力モータトルクおよび接線カトルク微分値の零次ダイナミクスの仮定 ($\dot{\hat{T}}_L = 0$) を使用している。 H は推定器のゲインである。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{G_r}{J_R} \\ 0 \end{bmatrix} T_m + H(\hat{\omega}_w - \omega_w) (10)$$

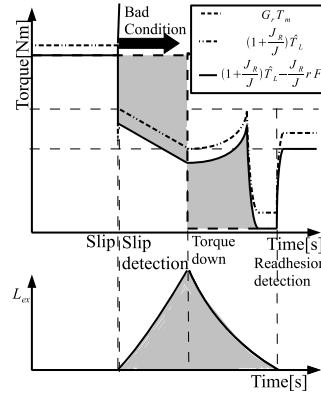


Fig. 1. Excess torque T_{ex}

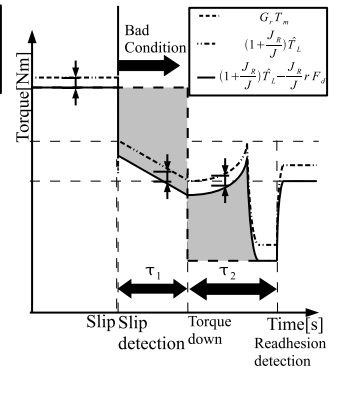


Fig. 2. Disturbance torque and angular momentum L_{ex} estimation

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \dots \dots (11)$$

2.3 再粘着のためのトルク指令パターン 以下では空転した時刻を t_{slip} 、空転検知した時刻を t_{detect} 、モータトルクを引き下げた時刻を t_{Tdown} 、モータトルクを引き上げた時刻を t_{Tup} 、空転検知してからトルクを引き下げるまでの時間を τ_1 、トルクを引き下げてから再粘着検知するまでの時間を τ_2 とする。

Fig. 2に外乱がある場合のモータトルク $G_r T_m$ および接線カトルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L$ 、接線カトルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L - \frac{J_R}{J} r F_d$ を示す。このままだと外乱トルクの大きさはわからないので、超過角運動量を十分に補償できないまま、トルクを引き上げてしまい、再空転が起こってしまう。そこで、空転再粘着時には勾配や走行抵抗による外乱トルクが一定であると仮定することで、外乱が加わった分を考慮した空転再粘着制御が実現できると考えられる。また、

(1) 突然良い粘着条件から悪い粘着条件になったとき (Case A)

(2) 悪い粘着条件が断続的に続くとき (Case B)

という2つのケースに分けて再粘着制御を適用する。これはFig. 3に示すようにトルクが一定値のときとトルクを線形に引き上げているときに超過角運動量の面積の形に変化が生じるためである。突然良い粘着条件から悪い粘着条件になったとき (Case A) は台形、悪い粘着条件が断続的に続くとき (Case B) は三角形に近似する。擬似的に超過角運動量を求めることができる。三角形および台形に近似した超過角運動量については余裕を持たせているため、実際の超過角運動量が近似により求めた超過角運動量より大きくなることは無い。

2.3.1 空転発生、検知後からトルク引き下げ時の超過角運動量, Case A 空転検知したときの超過トルクを $T_{ex,slip}$ 、空転検知後 τ_1 s のときの超過トルクを T_{ex,τ_1} とする。これら2つを使用して台形の超過角運動量の面積を求める。空転が拡大しているときの超過角運動量 L_{ex,τ_1} は式(12)であらわされる。Fig. 4に近似の概要を示す。

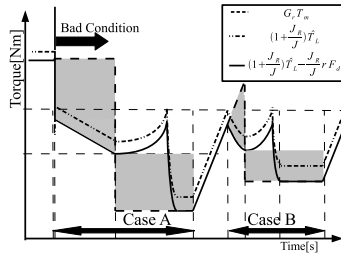


Fig. 3. Case analysis of re-adhesion control

Table 2. Torque pattern

Time	Explanation
t_{slip}	Slip generation
↓	Infinitesimal time $T_{m^*} = T_m$
t_{detect}	Slip detection
↓	τ_1 , $T_{m^*} = T_m$
t_{Tdown}	Torque down
↓	τ_2 , $T_{m^*} = T_{m-down}$
t_{Tup}	Torque up
↓	Time constant G_{up}

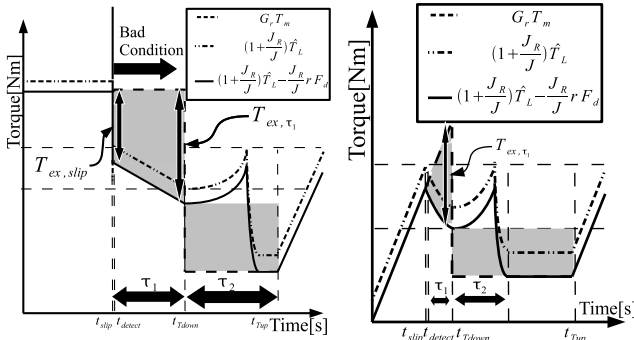


Fig. 4. Calculation of excessive angular momentum, Case A

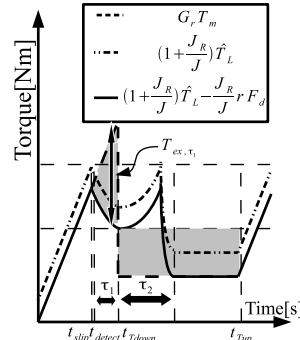


Fig. 5. Calculation of excessive angular momentum, Case B

Table 3. Parameters single axis bogie model

g	9.81
J	2.22×10^3
J_R	159
r	0.412
G_r	5.28

空転発生から再粘着し所定のトルクまでどのようにトルクが変化するかを Table 2 にまとめる。

2.3.4 機械系保護のためのトルク指令制限 電気鉄道車両の駆動系はギアを用いているため、その著しい磨耗を防止するためトルク指令が短い時間スケールにおけるゼロクロスを防止する必要がある。したがって、最低出力トルク T_{min} を用いて Fig. 6 に示すようにモータトルク指令値を T_{min} 以上となるように制限する。

3. 数値解析条件

今回用いた数値解析条件は以下のとおりである。まず、時刻 $t = 0.00$ s でトルク $T_m = 1.00 \times 10^3$ を入力する。トルクを入力するときの時定数 G を 1.00 s とした。

路面状況については $t = 6.00$ s で Fig. 7 の曲線 (a) から曲線 (b) に変化させた。 $t = 15.00$ s で Fig. 7 の曲線 (b) から曲線 (a) に変化させた。曲線 (a) は晴天時など路面状況が良い状態を、曲線 (b) は雨天時や降雪時など路面状況が悪い状態をあらわす。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。数値解析終了時間を $t = 24.00$ s とした。また、勾配は空転が起きやすいよう、登り 30.0 % とした。今回用いた数値計算の各定数を Table 3 に示す。

4. 粘着性能の評価

電気鉄道車両において、接線力が大きいということは車輪とレールでのエネルギー伝達がうまくいき、粘着性能が高いということである。しかし、空転をした状態で大きい接線力を持っていても、レールや車輪の磨耗と言う観点から好ましくない。そこで、粘着力の有効利用とレール、車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制御として評価する。

4.1 粘着利用率 参考文献⁽⁷⁾より最大接線力係数 μ_{max} の利用率を見るために、一定時間平均値を評価に用

$$L_{ex,\tau_1} = \frac{\tau_1}{2} (T_{ex-slip} + T_{ex,\tau_1}) \dots \dots \dots (12)$$

2.3.2 空転発生、検知後からトルク引き下げ時の超過角運動量, Case B 空転検知後 τ_1 s のときの車体の並進方向に伝達される電動機トルク $G_r T_m$ と接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L$ の差を T_{ex,τ_1} とする。空転が拡大しているときの超過角運動量 L_{ex,τ_1} は式 (13) であらわされる。これを使用して台形の超過角運動量の面積を求める。Fig. 5 に近似の概要を示す。

$$L_{ex,\tau_1} = \frac{\tau_1}{2} T_{ex,\tau_1} \dots \dots \dots (13)$$

2.3.3 基本パターン 確実に再粘着させるためのモータトルク指令値 T_{m^*} は空転する前の入力トルク T_m 、空転検知した時の接線力トルク $T_{L-detect}$ 、モータトルクを引き下げた時の接線力トルク $T_{L-detect}$ を使用して、式 (14) のようにあらわされる。トルクを上昇させるときは時定数 G_{up} で引き上げた。これはステップ状に指定トルクまで引き上げると再空転するためである。

$$T_{m^*} = \begin{cases} T_m & (t_{slip} < t < t_{Tdown}) \\ T_{m-down} & (t_{Tdown} \leq t \leq t_{Tup}) \\ T_{m-down} + G_{up}(T_m - T_{m-down})(t - t_{Tup}) & (t_{Tup} < t) \end{cases} \quad (14)$$

$t_{slip} < t < t_{detect}$ において、引き下げた後のモータトルク T_{m-down} は式 (15) に示すように 2.3.1, 2.3.2 で述べた超過角運動量を補償するように定める。

$$L_{ex,\tau_1} = \tau_2 (T_{L-detect} - T_{m-down}) \quad (15)$$

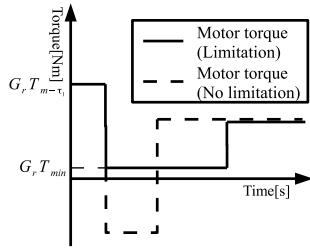


Fig. 6. Torque limitation

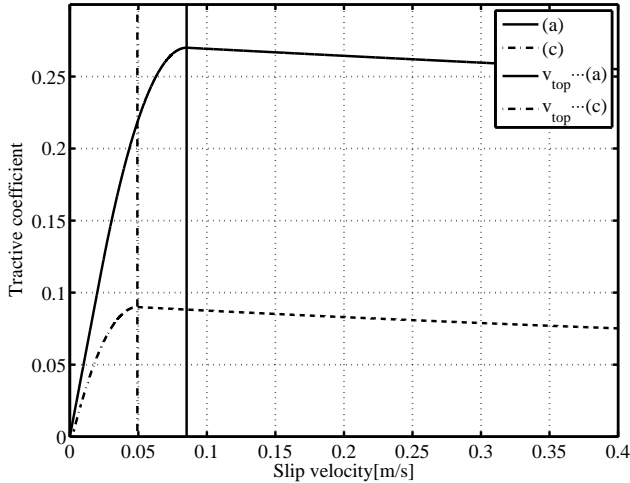


Fig. 7. Characteristic change between tractive coefficient and slip velocity

いる．式 (16) のように，ある時間内の粘着利用率の瞬時値の時間的平均値 $\bar{\mu}_{ur}$ を求める．

$$\bar{\mu}_{ur} = \frac{1}{t_{finish} - t_{start}} \int_{t_{start}}^{t_{finish}} \frac{\mu(t)}{\mu_{max}} \times 100 dt \quad (16)$$

ただし， $t_{start} = 6.00$ s， $t_{finish} = 15.00$ s とした．Fig. 7 より， μ_{max} を 0.09 とした．

4.2 動輪周損失摩擦力 参考文献⁽⁸⁾ より動輪周損失摩擦力 F_{slip} を評価に用いる．線路と車輪に働く接線力 T_L が単位時間にする仕事 W_{slip} は式 (17) で表される．

$$W_{slip} = \mu(v_s) Wg \cdot v_s \quad (17)$$

W_{slip} を時間積分し，移動距離で除した力は発熱を引き起こし，線路の磨耗につながっている．そのため，これを動輪周損失摩擦力 F_{slip} とし，式 (18) で定義する．

$$F_{slip} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{finish}} \mu(v_s) Wg \cdot v_s dt}{\int_{t_{start}}^{t_{finish}} v_b dt} \quad (18)$$

ただし， $t_{start} = 6.00$ s， $t_{finish} = 15.00$ s とした．

5. 数値解析による提案した制御法の粘着性能の評価

5.1 モータトルクおよび接線力トルク軌跡 空転検知からトルク引き下げまでにかかる時間を $\tau_1 = 100$ ms，トルク引き下げ定数 $k = 0.250$ に固定した．

以下に接線力係数，すべり速度，トルクを Fig. 8 から Fig.

Table 4. Tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$ and Loss friction force around driving wheel $F_{slip}(\tau_1)$

τ_1 [ms]	Tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$	Loss friction force around driving wheel F_{slip}
50.0	92.6 (100 %)	68.4 (100 %)
100	92.4 (100 %)	111 (162 %)
200	81.2 (87.7 %)	245 (358 %)
400	61.2 (66.1 %)	933 (1.34×10 ³ %)

10 に示す．Fig. 8 において接線力トルクは $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L$ ，モータトルクは $G_r T_m$ を示している．定常状態（粘着状態）において接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L$ およびモータトルク ($G_r T_m$) の差分が外乱トルクとなる．

Fig. 10 において，モータトルクと接線力トルクの差分が超過トルクとなっている．また，空転情報は同じ図で表現するために 1000 倍して，0 と 1000 で表現している．空転情報がちょうどトルクを引き下げたところで 0 から 1000 となっているのは空転を検知して， τ_1 s 間情報を獲得する時間をみているためである．空転検知からトルク引き下げまでの時間 τ_1 は 100 ms，空転検知からトルク引き下げまでの時間 τ_2 は 250 ms であることが確認できる．空転再粘着制御をしている間には列車抵抗がほとんど変化せず，この空転再粘着制御の有用性が確認される．

提案再粘着制御の特長を以下にまとめる．

- (1) わざと決まった時間，空転をさせることで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，正確に再粘着できる．
- (2) 超過角運動量の補償に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，逐次計算をする必要が無い．

5.2 パラメータ解析 本小節では提案再粘着制御において重要な 3 つのパラメータについて感度解析を行う．この 3 つのパラメータとは空転検知からトルクを引き下げるまでの時間 τ_1 ，超過トルクの何倍引き下げるかという定数 k ，トルク引き上げ時定数 G_{up} である．

まず，空転検知からトルクを引き下げるまでの時間 τ_1 について検討を行う． τ_1 はどれだけの超過角運動量を溜め込むかを定めるものである．大きくすると溜め込む超過角運動量は大きくなるが，その分空転発生から空転検知までのおよそ 40 ms 超過角運動量は無視することができる．一方，小さくすると溜め込む角運動量は小さくなり空転収束までの時間は短くなるものの，空転発生から空転検知までの超過角運動量は無視しづらくなる．Table 4 に k を 0.200， G_{up} を 1.00 s に固定したとき， τ_1 を 50.0，100，200，400 ms と変化させたときの粘着利用率および動輪周損失摩擦力を示す．よって，以下では空転発生から空転検知まで時間 50 ms を考慮して， $\tau_1 = 100$ ms と固定して解析を行う．

次に残る超過トルクの何倍引き下げるかという定数 k ，トルク引き上げ時定数 G_{up} という 2 つのパラメータを変

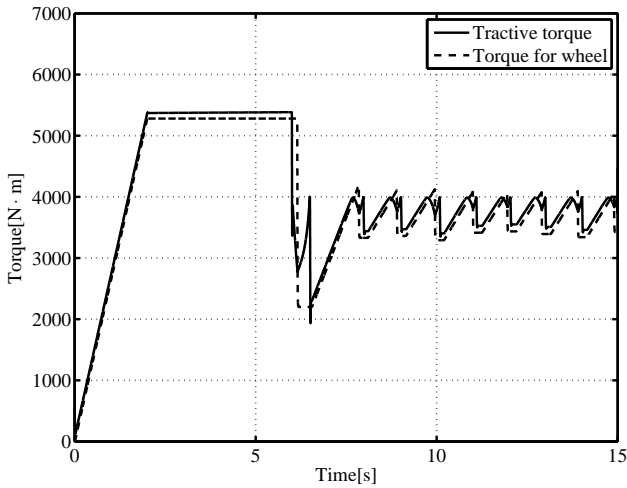


Fig. 8. Motor torque and adhesive torque (Proposed)

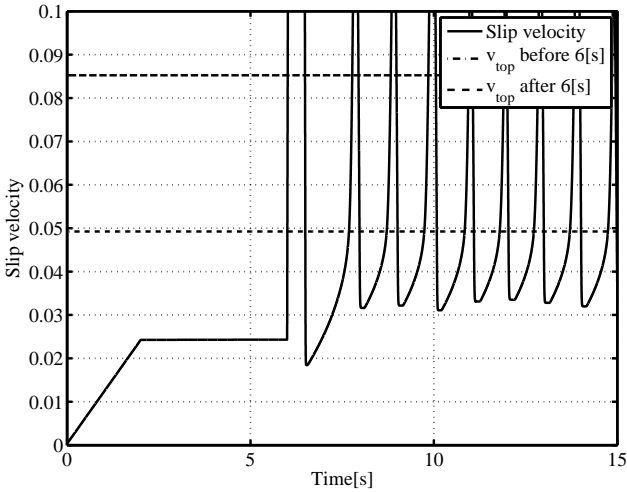


Fig. 9. Slip velocity (Proposed)

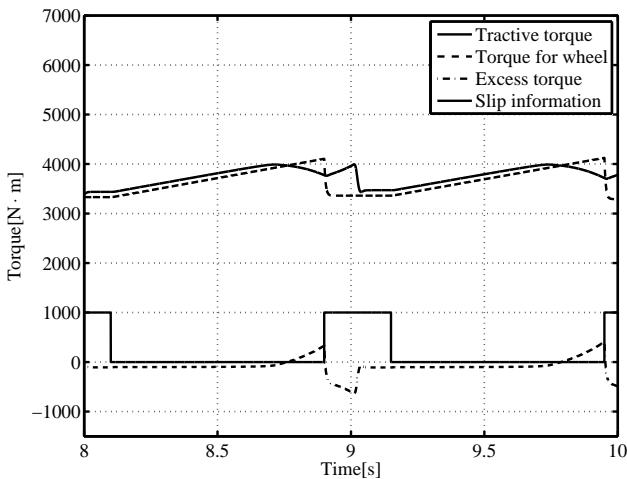


Fig. 10. Motor torque and adhesive torque (Proposed, $t=8.00-10.00$ s)

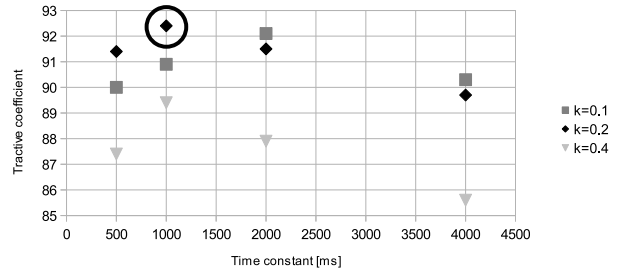


Fig. 11. Tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$

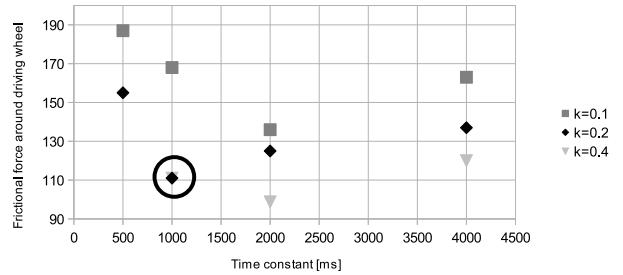


Fig. 12. Loss friction force around driving wheel F_{slip}

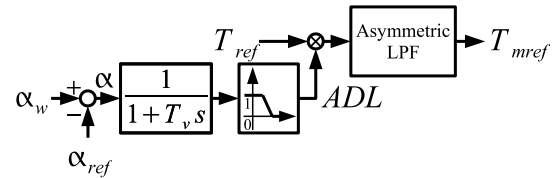


Fig. 13. A block diagram of re-adhesion controller

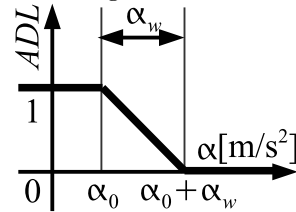


Fig. 14. Nonlinear table characteristic between

定数 1.00 s から 2.00 s 付近において極大値を持つことがわかる．また，動輪周損失摩擦力についても時定数 1.00 s から 2.00 s 付近においても極小値を持つことがわかる．ただし，これら 2 つの評価指標は積分区間によって大きく変わることから一概に結論付けることはできない．

以上より，空転検知からトルク引き下げまでの時間 $\tau_1 = 100$ ms，トルク引き上げ時定数 $G_{up} = 1.00$ s，超過トルクの何倍引き下げるかという定数 $k = 0.200$ と決めた．

5.3 提案再粘着制御と従来再粘着制御の比較

5.3.1 従来再粘着制御の概要 本小節では従来再粘着制御⁽⁶⁾と提案再粘着制御の比較を行う．従来再粘着制御の構成ブロック線図を Fig. 13 に示す⁽⁶⁾．ただし， α_w は軸角加速度， α_{ref} は指令加速度， T_{ref} はトルク指令値， T_{m-ref} はモータトルク指令， T_v は直列遅れ要素の時定数である．ファジィ近似演算部の構成を Fig. 14 および式 (19) に示す．式 (19) は入力である動輪周加速度偏差 α に

化させ，粘着利用率，動輪周損失摩擦力を見て決定する．Fig. 11, Fig. 12 にパラメータを変化させたときの粘着利用率，動輪周損失摩擦力を示す．粘着利用率については時

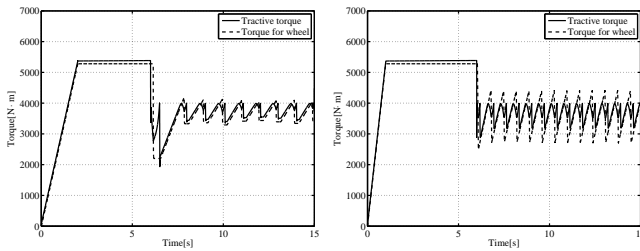


Fig. 15. Motor torque and adhesive torque (Proposed)

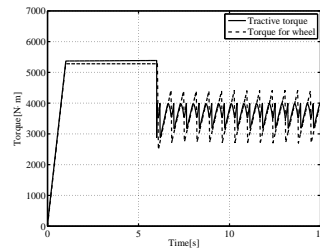


Fig. 16. Motor torque and adhesive torque (Conventional)

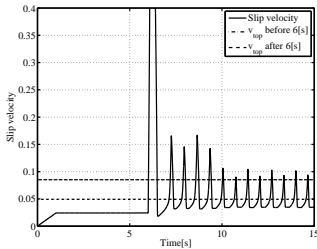


Fig. 17. Slip velocity (Proposed)

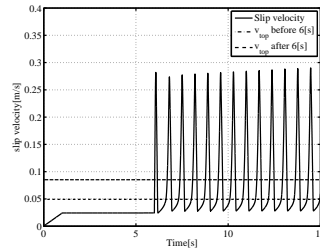


Fig. 18. Slip velocity (Conventional)

Table 5. Comparison between conventional and proposal re-adhesion control

Method	Tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$	Loss friction force around driving wheel F_{slip}
Proposed	92.4 (↑↑ 0.500 %)	111 (↓↓ 21.3 %)
Conventional	91.9 (100 %)	142 (100 %)

についての関数である． α_0 は粘着度低減幅開始加速度偏差， $\alpha_w (> 0)$ は粘着度低減幅である． ADL は粘着度であり，どれくらいのトルクを出すべきかと言う指標になっている．

$$ADL = \begin{cases} 1 & (\alpha \leq \alpha_0) \\ 1 - \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_w} & (\alpha_0 < \alpha < \alpha_0 + \alpha_w) \\ 0 & (\alpha_0 + \alpha_w \leq \alpha) \end{cases} \quad (19)$$

α が α_0 より小さいとき，車輪とレールが粘着している状態を仮定し， $ADL = 1$ ，つまりモータトルク T_{mref} はトルク指令値 T_{ref} と同じとする． α が $\alpha_0 + \alpha_w$ より大きいとき，車輪とレールが粘着していない状態を仮定し， $ADL = 0$ ，つまりモータトルク T_{mref} は 0 とする． α が α_0 と $\alpha_0 + \alpha_w$ の間にある場合は線形補完により出力 ADL を設定している．

5.3.2 粘着利用率と動輪周損失力における比較 前小節で述べた推定接線力，すべり速度情報を使用しない再粘着制御⁽⁶⁾と提案再粘着制御の比較を行う．Figure 15, 16 はモータトルクおよび接線力トルクである．Figure 17, 18 は各方式のすべり速度である．これらの粘着利用率および動輪周損失摩擦力は Table 5 に示す．Table 5 より従来再粘着制御は提案再粘着制御方式と比較して，粘着利用率が 0.500 % とほとんど変わらず，動輪周損失摩擦力が 21.3 % 小さくなった．以下の 2 つの点で改良されているためである．

(1) 空転検知までの時間を短くすることで超過角運動量を削減している．

(2) トルクの引き下げ量 k を少なくし，トルク引き上げ時定数 G_{up} を大きくすることで，空転せずに高粘着利用率を実現する．

6. 結論と今後の課題

本論文では超過角運動量という新しい評価量を活用した再粘着制御について提案し，接線力係数の最大値が 0.09 と極めて低い条件下における提案再粘着制御の実用性を数値解析により確認した．数値解析より，以下の提案再粘着制御の特長が確認された．

- (1) わざと決まった時間，空転をさせることで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，正確に再粘着できる．
- (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，逐次計算をする必要が無い．

超過角運動量を見ることで，再空転の誘発の防止や空転の程度の大きさを図ることができた．

従来の再粘着制御との比較をどれくらい粘着状態が良いかを示す粘着利用率と線路にどれくらいの負担があるのかを示す動輪周損失摩擦力という相反する 2 つの判断基準について相互の妥協点を探る制御を良い制御と考え，パラメータの設計を行った．設計値を利用し，従来の空転再粘着制御との比較をした結果，粘着利用率が 0.500 % の向上とほとんど変わらないのに対して，動輪周損失摩擦力が 21.3 % 削減することができ，粘着力の有効利用を図りつつ，レール，車輪の傷みを軽減することができた．

今後の課題としてはまず空転発生から空転検知までの時間の短縮が挙げられる．検知時間の短縮により，溜まる超過角運動量を削減でき，再粘着までの時間短縮を図ることができることが期待される．

文献

- (1) 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)
- (2) 大石潔・小川泰明・中野建・宮下一郎・保川忍：「1 次外乱オブザーバに基づく電気車の空転再粘着制御方式」，電学論 D ， 120, 3, pp.382.389 (2000-3)
- (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)
- (4) 門脇悟志・畑正・廣瀬寛・大石潔・飯田哲志・高木正志・佐野孝・保川忍：「速度センサレスベクトル制御・外乱オブザーバによる空転再粘着制御の実車両への適用とその評価 205 系 5000 番台電車における実例」，電学論 D ， 124, 9, pp.909.916 (2004-9)
- (5) 永瀬和彦・田川直人・前橋栄一・野元浩・沖倉桂：「レール・車輪間の粘着に関する実態調査の研究 (第 3 報)」第 24 回 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集 (1987)，pp. 282-286
- (6) 槻木澤佑公・古閑隆章・根来秀人・村端章浩：「電気車の再粘着制御時における接線力特性軌跡と再粘着可能性 - 一軸モデルに基づく計算 - 」，TER-08-37 (2008-9)
- (7) 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 (2M2C) の空転再粘着制御の方式」，IEEJ Trans. IA, Vol.127, No.8, 2007
- (8) 原崇文・槻木澤佑公・古閑隆章・村端章浩・岡山秀夫：「電気車における推定接線力，すべり速度情報を活用した再粘着制御」，TER-10-38 (2010-7)