

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数値計算

槻木澤佑公*, 古関隆章 (東京大学), 根来秀人, 村端章浩 (三菱電機)

A calculation of the trajectory of tractive adhesion coefficient and readhesion possibility during readhesion control of an electric rolling stock

Yutaka Tsukinokizawa*, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Hideto Negoro, Akihiro Murahashi (Mitsubishi Electric Corporation)

Abstract

It is important in the viewpoint that secures the acceleration not to cause the slip and to use adhesion phenomenon effectively in railways. I would like to examine the condition of causing the slip with Adhesion control. On the other hand, it is known that the tractive coefficient is shown as a function at the slip velocity. In this paper, tracks of the tractive coefficient characteristic with the Adhesion control and the possibility of the readhesion control as the comprehensive phenomenon are described.

キーワード: 電気鉄道 空転 粘着制御 接線力
(electric railway slip adhesioncontrol tractive force)

1. はじめに

鉄道においてその推進には鉄車輪とレール間の接線力を利用しており、鉄道の分野においては一般的に粘着力と呼ばれている。従って電気車の性能向上には物理的特性により制限された粘着力の有効活用が重要となる。鉄道における粘着現象の特徴は最大粘着力を軸重で規格化した粘着係数について 0.3p.u. 程度であり、天候などの条件によって大きく変動する⁽¹⁾。

この制約の元で電気車の性能を向上させるために運転中に引張力が接線力を上回った瞬間に発生する空転/滑走の発生を許容しながら動輪が空転した場合に粘着状態に戻す再粘着制御の適用がインバータ駆動とともに主流となった。

しかし、従来の多くの再粘着制御では制御入力に対して瞬間接線力値を利用しない⁽²⁾ため、粘着係数が低下した場合に再粘着に失敗することがある。再粘着制御器の本来の目的は空転・滑走の発散を抑えることにあるので、そのような場合でも確実に再粘着する制御が望ましい。

本論文では接線力係数特性を、車輪周速度と車体速度の差である滑り速度の関数として仮定し、この接線力係数特性と制御系の構成に特化した議論をする車体モデルとして1動軸モデルを用いた数値計算で行う。その仮定より電気車の加速時における再粘着制御時の接線力特性の振る舞いと再粘着可能性について知見を得ることを目的とする。

2. 数値計算モデル構成

2.1 接線力特性 接線力係数-すべり速度特性は図1のように仮定する。滑り速度の絶対値が小さく接線力係数の傾き $\frac{d\mu}{dv_s}$ が正で入力に対する滑り速度の応答が安定な微視滑り領域と呼ばれる領域と、滑り速度の絶対値が大きく接線力係数の傾き $\frac{d\mu}{dv_s}$ が負で応答が安定でない巨視滑り領域がある。図1のように接線力係数が連続かつ微分可能

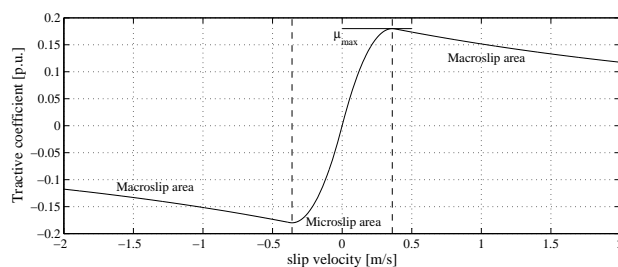


図1 接線力係数-すべり速度特性概念図

Fig. 1. A characteristic of tractive coefficient from slip velocity

であり、原点に対称とする。

本論文においては滑り速度が正で接線力係数最大値を粘着係数 μ_{MAX} 、微視滑り領域について傾きを g_1 ($g_1 > 0$) である直線、巨視滑り領域については傾きの最小値 $-g_2$ ($g_2 > 0$) として滑り速度が無限大で μ_{inf} ($\mu_{inf} > 0$) に収束するような指数関数で近似する。この2領域を二次係数 C_{top} ($C_{top} > 0$) とした放物線でつなく、その近似を式(1)に示す。 $v_s < 0$ の領域については原点对称として定式化する。

$$\mu(v_s) = \begin{cases} g_1 v_s & (v_s \leq v_1) \\ \mu_{MAX} - C_{top}(v_s - v_{top})^2 & (v_1 < v_s < v_2) \\ \mu_{inf} + B \exp[(v_2 - v_s) \frac{g_2}{B}] & (v_2 \leq v_s) \end{cases} \quad (1)$$

ただし C_{top} は原点での連続性より式(2)のように制約される。

$$v_1 = \frac{\mu_{MAX}}{g_1} - \frac{g_1}{4C_{top}} \geq 0$$

$$C_{top} \geq \frac{g_1^2}{4} \dots \dots \dots (2)$$

さらに、式(1)で使用されている補助パラメータ v_1, v_{top}, v_2, B を式(3)~式(6)に示す。

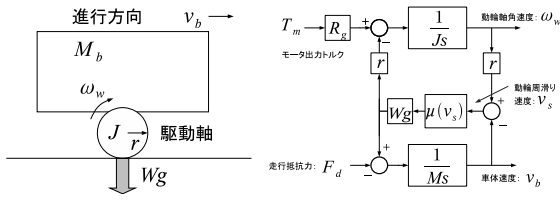


図2 1軸車両モデル構成 図3 1軸車両モデルブロック線図
Fig. 2. Single axis bogie Model Fig. 3. Block diagram of the single axis bogie model

表1 1軸車両モデルに適用パラメータ
Table 1. Parameters single axis EMU model

定数	定数值 [単位]	解説
M	20[ton]	1 動軸あたり車体重量
W	10[ton]	動軸上質量
J	155.01[kg・m ²]	動軸軸重合成慣性性能率
r	0.43[m]	動輪半径
R_g	7.07	ギア比
g	9.0855[m/s ²]	重力加速度

$$v_1 = \frac{\mu_{MAX}}{g_1} - \frac{g_1}{4C_{top}} \dots \dots \dots (3)$$

$$v_{top} = \frac{\mu_{MAX}}{g_1} + \frac{g_1}{4C_{top}} \dots \dots \dots (4)$$

$$v_2 = \frac{\mu_{MAX}}{g_1} + \frac{g_1}{4C_{top}} + \frac{g_2}{2C_{top}} \dots \dots \dots (5)$$

$$B = \mu_{MAX} - C_{top} \left(\frac{g_2}{2C_{top}} \right)^2 - \mu_{mf} \dots \dots \dots (6)$$

以下のケーススタディでは測定事例⁽³⁾に基づき $g_1 = 5$, $C_{top} = 40$, $g_2 = 0.05$ と固定し, 粘着係数 μ_{MAX} をシナリオに従って変動させる.

2.2 車体モデル 本論文では, 接線力係数特性と制御系の構成に特化した議論のため, 1車体と1動軸の2慣性系からなる1軸モデルに基づく計算を行う. 図2にその構成を示し, 図3にブロック線図を示す. 動軸ダイナミクスを式(7), 車体ダイナミクスを式(8), 滑り速度, 動輪周速度, 車体速度の関係性を式(9)に示す. 数値計算に適用した各定数⁽⁵⁾を表1に示す.

$$J\dot{\omega}_w = T_m R_g - W g r \mu(v_s) \dots \dots \dots (7)$$

$$M\dot{v}_b = W g \mu(v_s) - F_d \dots \dots \dots (8)$$

$$v_s = r\omega_w - v_b \dots \dots \dots (9)$$

J は動輪軸合成慣性性能率, M は1動軸当たり車体重量, W は動軸上にある車体質量, T_m は電動機出力トルク, R_g はギア比, g は重力加速度, r は動輪半径, F_d は走行抵抗, $\mu(v_s)$ は接線力係数, v_s は滑り速度, ω_w は動輪角速度, v_b は電気車車体速度を示す. モータの出力トルク特性は時定数5msの一次遅れ系とした.

2.3 再粘着制御系 現在の電気車においては多様

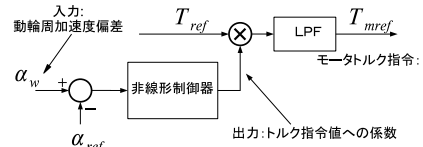


図4 再粘着制御系モデルブロック図
Fig. 4. A block diagram of readhesion controller

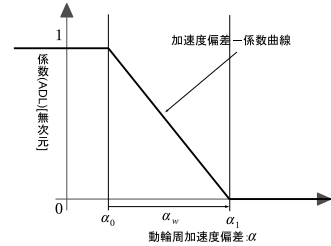


図5 加速度偏差入力 - トルク係数出力特性
Fig. 5. Nonlinear table characteristic between acceleration difference and torque coefficient

な再粘着制御法が提案, 適用されている. 本論文においては静的な非線形絞込みテーブルに基づく粘着制御⁽⁴⁾を1軸モデルに適用することを考える.

まず, 粘着制御器の出力として運転台指令トルクへの係数係数 Adl ($T_{mref} = Adl \cdot T_{ref}$) を定義する. ただし T_{mref} : モータ指令トルク, T_{ref} : 運転台指令トルクである. 本再粘着制御は概して複数駆動軸のすべてが一度に空転を引き起こすことはまれであると仮定する. 各軸の速度情報と加速度情報の差を入力とし, 入力がどちらも0であるときは粘着状態にあるとみなし $Adl = 1$ を出力, 入力が正の値であるにはその度合いに応じて0~1までの連続値 Adl を出力する.

これを1軸モデルに適合するよう図4に示す構成とした. 駆動する軸数が1であるので各軸の速度情報と加速度情報の差の情報は利用できない. また, 速度センサレス構成を考慮して入力情報を擬似微分時定数 τ とした微分器⁽⁶⁾で求めた動輪周加速度とし, 基準加速度を空転が発生しない場合の加速度とみなせる運転台指令加速度を基準としてその差を制御器の入力値とする.

その入力値に対して入力値がトルク絞込み加速度偏差余裕 α_0 以下では粘着しているとみなして係数 $Adl = 1$, トルク絞込み加速度偏差余裕とトルク絞込み加速度偏差幅の和 $\alpha_0 + \alpha_w$ 以上の値では完全に空転しているとみなしトルクを0に引き下げるため, トルク係数 $Adl = 0$ を出力する. その中間部を線形補間すると図5に示す非線形絞込みテーブルとなる. その後段にフィルタを運転台指令トルクと粘着度の積とモータ指令トルク出力の間に置く.

この制御器では, 以下の4パラメータで特性が設定できることになる.

- トルク低減加速度偏差幅 α_w
- トルク低減加速度偏差余裕 α_0
- トルク増大/減少時定数 T_u および T_d

表 2 ケーススタディのシナリオ

Table 2. Case study scenario

時刻 [s]	動作
-1	シミュレーション開始
0	加速開始 指令加速度 $\alpha = 3.0[\text{km/h/s}]$ 計画粘着係数 $\mu_{use*} = 0.17$
6	粘着係数低下 $\mu_{MAX} = \mu_{lim}$
14	粘着係数復帰 $\mu_{MAX} = 0.18$
15	シミュレーション終了

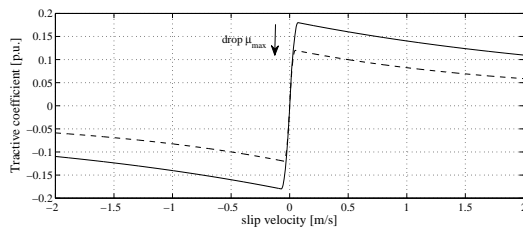


図 6 接線力係数特性の減少設定

Fig. 6. Case setting of reductive tractive coefficient

• 速度信号擬似微分時定数 τ

2.4 数値計算の条件設定

ケーススタディのシナリオは以下のように設定した。シミュレーション開始は時刻-1secとする。時刻0secに加速を開始し、粘着係数を制限粘着係数 μ_{lim} に低減させ、再粘着動作を開始させる6secまでモータトルクを引き上げる。そして14secまでの8秒間に再粘着動作を行わせ、14secに粘着係数 μ_{MAX} を復帰させ、再粘着動作を終了させる。初期条件は粘着係数 $\mu_{MAX} = 0.18$ 、電気車速度0m/sである。走行抵抗 F_d は0としている。ここで、粘着係数を0.18から0.12に低下させた場合の接線力特性の変化を図6に示す。計算環境にはMATLAB/Simulinkを利用し、シミュレーションステップ時間は50 μ s一定とした。

3. 接線力特性軌跡と再粘着可能性の検討

3.1 動作例及び接線力特性軌跡 本小節では再粘着に成功する場合と再粘着に失敗する場合の再粘着制御系の動作の特徴について述べる。粘着係数は双方とも0.18から0.12に低下させた。

再粘着制御が成功する場合の再粘着制御器のパラメータでは、小さい加速度偏差でトルク絞込みを大きくする。すなわち小さいトルク低減加速度偏差幅 α_w 、トルク低減加速度偏差余裕 α_0 を設定した。これを条件Aとして数値を $\alpha_w=0.2$ 、 $\alpha_0=0.4$ とする。再粘着制御が失敗する場合の再粘着制御器のパラメータでは、トルク絞込みを小さくするため大きい α_w 、 α_0 とする。これを条件Bとして数値を $\alpha_w=0.8$ 、 $\alpha_0=0.4$ とする。

条件Aにおける滑り速度の時間特性を実線で、微視滑り領域と巨視滑り領域の境界滑り速度を破線で図7に示す。時刻6secで粘着係数が接線力係数を下回り空転が発生しているが、再粘着制御器により巨視滑り領域から微視滑り領

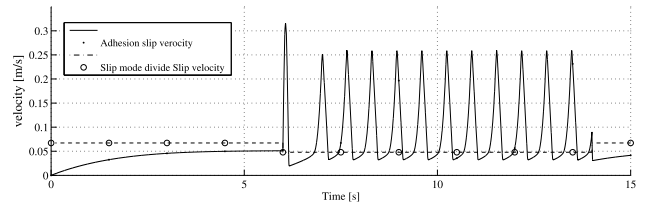


図 7 再粘着成功時の滑り速度 時間特性

Fig. 7. The v_s - t characteristic in success readhesion

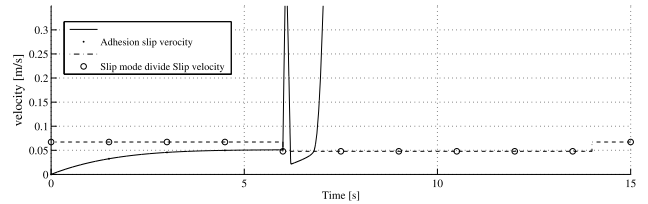


図 8 再粘着失敗時の滑り速度 時間特性

Fig. 8. The v_s - t characteristic in fail readhesion

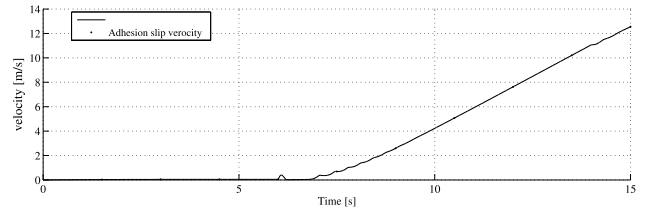


図 9 再粘着失敗時の滑り速度 時間特性縮小図

Fig. 9. The v_s - t characteristic in fail readhesion reduced view

域に戻す動作の繰り返して空転の発散が防がれることがわかる。条件Bの結果を図8に示す。時刻6secに発生した空転状態は一度粘着状態に戻るが、時刻7sec付近で発生した空転を戻すことができず最終的にすべり速度が発散する。これを図9に示す。

このときのモータトルク指令と瞬間接線力係数との関係と比較しやすくするため、モータトルク指令を接線力係数スケール換算係数 $k_{T2\mu} = \frac{R_g}{W_{gr}} \frac{M}{r}$ によって換算したモータトルク指令を実線、瞬間接線力係数を破線で、Aについて図10に、Bについて図11に示す。条件Aでは瞬間接線力係数が低下した時に十分なトルク引き下げが行われているが、条件Bではトルク引き下げが不足している。さらに再粘着動作時におけるトルク係数 Adl の特性は、再粘着に成功した条件Aで空転と粘着を繰り返す周期が0.65sec程度に対し、 Adl が中間値をである時間10msオーダで、 Adl が0または1である時間の占める割合が高いことを図12に示す。

再粘着に失敗した条件Bでは時刻6secにおいて1度目の空転が発生した場合においては再粘着に成功した場合とほぼ同じ動作であるが、2度目の空転発生からは Adl が0まで低下せず3秒程度である一定の値に収束する。これを図13に示す。

また、設定したシナリオにおいて数値計算を行ったすべり

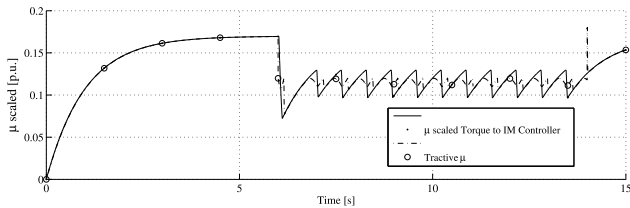


図 10 再粘着に成功時の瞬間接線力係数 時間特性
Fig. 10. The time characteristic of tractive μ and torque to IM in success readhesion

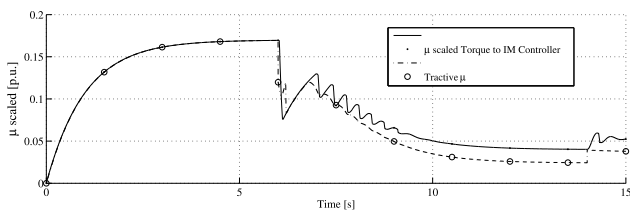


図 11 再粘着に失敗時の瞬間接線力係数拡大図 時間特性
Fig. 11. The time characteristic of tractive μ and torque to IM in fail readhesion

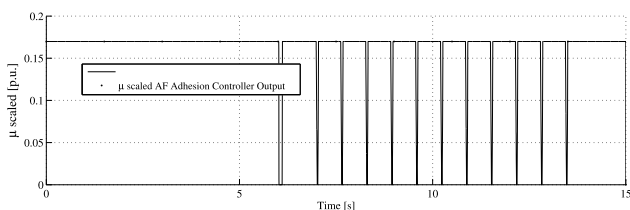


図 12 再粘着に成功時の接線力係数換算 Adl 時間特性
Fig. 12. The time characteristic of μ scaled Adl in success readhesion

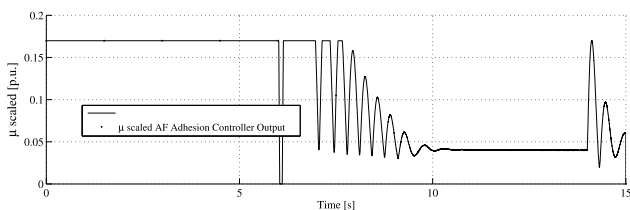


図 13 再粘着に失敗時の接線力係数換算 Adl 時間特性
Fig. 13. The time characteristic of μ scaled Adl in fail readhesion

速度と接線力係数に換算したモータトルク指令値の軌跡を条件 A について図 14 に示す．粘着係数を低下させ瞬間から 2 回空転発生と空転収束を繰り返した後にリミットサイクルに収束している．再粘着に失敗した条件 B では破線に示す瞬間接線力係数に比してモータトルク指令値の低下量が不足しているためすべり速度が発散することが分かる．これを図 15 に示す．

再粘着制御に失敗する場合にはトルク引き下げが接線力係数の低下に対して不足している事が確認できた．

3・2 再粘着制御系の評価基準 良い再粘着制御器は，低い粘着係数でも再粘着に成功し，さらに平均的に高

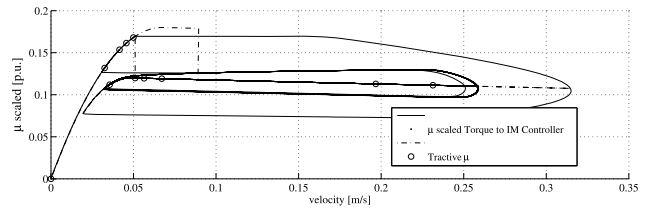


図 14 再粘着に成功時の瞬間接線力係数，接線力係数換算モータ指令トルク 滑り速度特性
Fig. 14. The loci of μ scaled T_{mref} - slip velocity in success readhesion

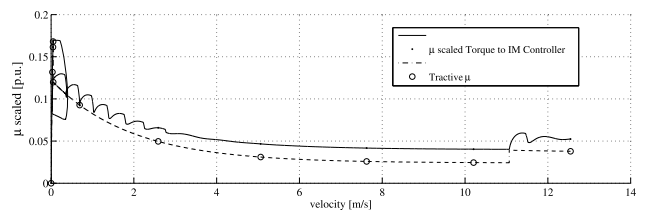


図 15 再粘着に失敗時の瞬間接線力係数，接線力係数換算モータ指令トルク 滑り速度特性
Fig. 15. The loci of μ scaled T_{mref} - slip velocity in fail readhesion

い加速力発揮との両立ができる．その性能評価のために

- 再粘着可能性
- 限界粘着係数
- 粘着利用率

の 3 項目の指標を定める．

再粘着可能性は，再粘着制御器により空転・滑走の発散を抑え平均的な再粘着が可能か否かを示す．ここでは，再粘着に成功する場合にモータ指令トルク - 滑り速度の軌跡がリミットサイクルを描く特性を利用して，時刻 14sec を含むトルクを上昇させはじめる時刻から次にトルクを上昇させはじめる時刻までの 1 サイクル中に粘着状態が巨視滑り状態と微視滑り状態を行き来する場合を再粘着が成功するとし，再粘着可能性があると定義する．

限界粘着係数はある制御器のもとで再粘着可能な最小の粘着係数である．これは粘着係数が低下すると再粘着に成功しにくくなる前小節の結果に基づき仮定する．

粘着利用率 μ_r は，式 (11) に示すように粘着係数を低下させ空転を発生させる 6sec から 14sec における式 (10) に示す瞬間接線力係数の時間平均である利用接線力係数 μ_{use} の，低下させた粘着係数 μ_{lim} に対する比である．

$$\mu_{use} = \frac{1}{8} \int_6^{14} \mu(t) dt \dots \dots \dots (10)$$

$$\mu_r = \frac{\mu_{use}}{\mu_{lim}} \dots \dots \dots (11)$$

3・3 再粘着制御系におけるパラメータ感度解析 本小節では前小節に記述した 3 指標と制御器定数との関係を導く．制御器パラメータの設定はトルク絞込み加速度偏差余裕を $\alpha_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ とし，ト

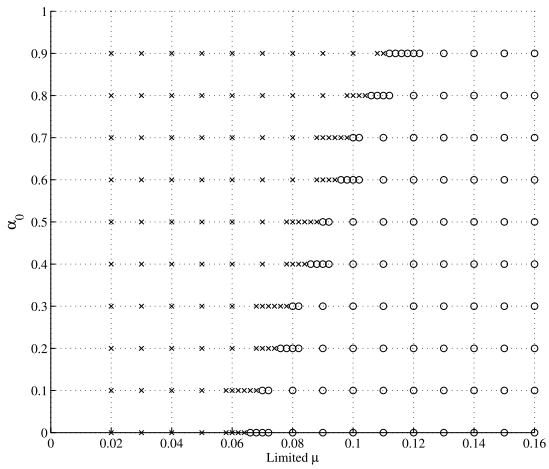


図 16 α_0 を変動させた場合の再粘着可能性
Fig. 16. Readhesionability of flucturate α_0

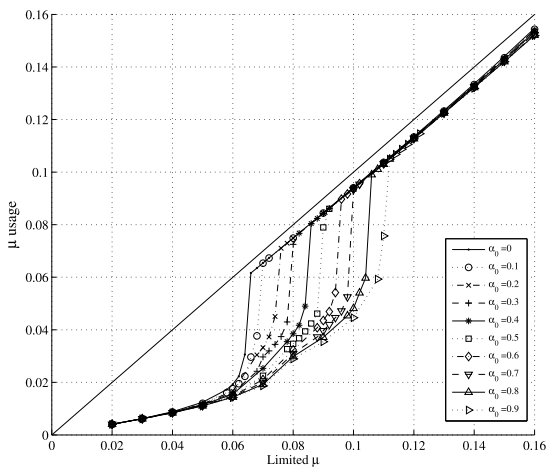


図 17 α_0 による粘着係数 - 利用接線力係数特性
Fig. 17. The characteristic $\mu_{use}-\mu_{lim}$ with flucturate α_0

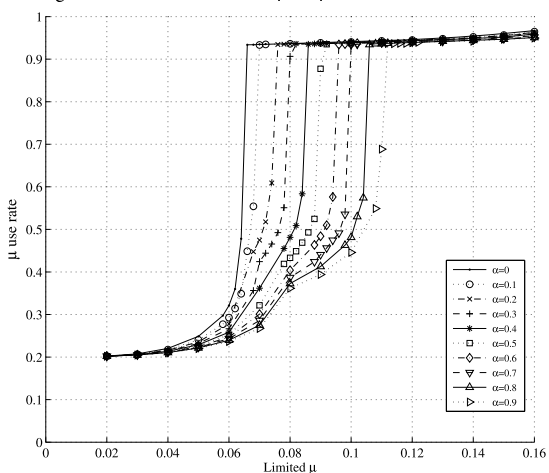


図 18 α_0 による粘着係数 - 対粘着係数利用率特性
Fig. 18. The characteristic $\mu_r-\mu_{lim}$ with flucturate α_0

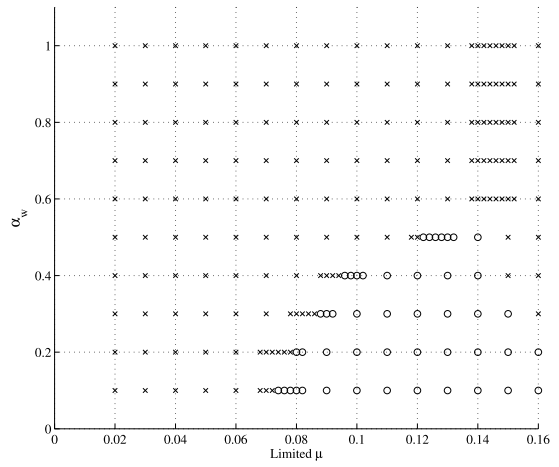


図 19 α_w を変動させた場合の再粘着可能性
Fig. 19. Readhesionability of flucturate α_w

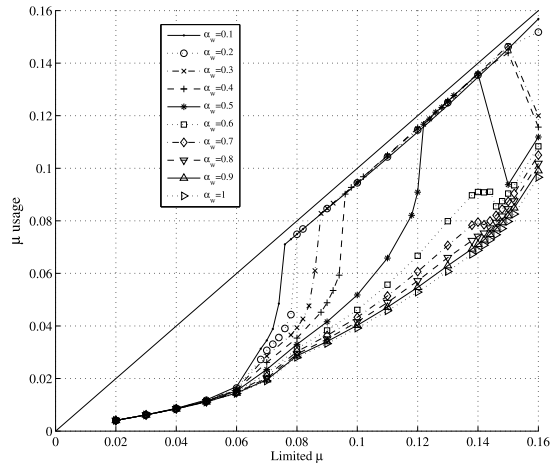


図 20 α_w による粘着係数 - 利用接線力係数特性
Fig. 20. The characteristic $\mu_{use}-\mu_{lim}$ with flucturate α_w

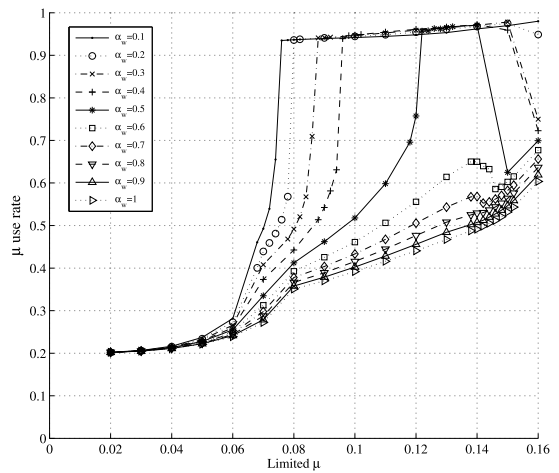


図 21 α_w による粘着係数 - 対粘着係数利用率特性
Fig. 21. The characteristic $\mu_r-\mu_{lim}$ with flucturate α_w

トルク絞込み加速度偏差幅を $\alpha_w = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ とする。制限粘着係数 μ_{lim} は 0.16 から 0.01 刻みで 0.02 まで低下させた。限界粘着係数付近では、限界粘着係数の精度を高めるため 0.002 刻みの制限粘着係数を設定した。

トルク絞込み加速度偏差余裕 α_0 を変化させた場合の再粘着可能性を図 16 にまとめた。この図で制限粘着係数 - トルク絞込み加速度偏差余裕平面内のマーカが \circ の場合には再粘着可能性が満たされ、 \times の場合には再粘着可能性が満たされないことを示す。 α_0 が小さいほど再粘着可能性を満たす限界粘着係数が小さくなる。したがって、再粘着可能な領域を広げ、限界粘着係数を低下させるには α_0 を小さく設定すればよい。

また図 17 に利用接線力係数 - 制限粘着係数特性を示す。なお、 $\mu_{lim} = \mu_{use}$ である直線は理想的な再粘着制御を行った場合の特性を示す。再粘着に失敗する場合は限界粘着係数より少し小さい制限粘着係数で利用接線力係数が急激に低下する。再粘着に成功する領域ではトルク絞込み加速度偏差余裕 α_0 を変化させた場合、利用接線力係数の差は 0.001 オーダにすぎない。一方、図 18 に示すよう縦軸を粘着利用係数とすると、粘着に成功する場合のトルク絞込み加速度偏差余裕 α_0 による粘着利用係数の差は % オーダとなる。

トルク絞込み加速度偏差幅 α_w を変化させた場合の再粘着可能性の変化を図 19 に示す。 α_w を大きくしてトルク絞込み感度を低下させると限界粘着係数が大きくなる。 $\alpha_w \geq 0.6$ の範囲では全く再粘着できない。この場合の利用接線力係数 - 制限粘着係数特性を図 20 に示す。制限粘着係数が 0.16 程度の微小な粘着条件において、 $\alpha_w = 0.3$ でそれより低い制限粘着係数の場合より利用接線力係数が低下していることがわかる。さらに、図 18 に示すよう縦軸を粘着利用係数とすると、再粘着に成功する場合においてはトルク絞込み加速度偏差幅 α_w が大きくトルク絞込み感度が小さいほど粘着利用係数が高い。また、制限粘着係数が 0.16 といった微小な粘着係数の低下に対してトルク絞込みが足りない結果、中途半端な滑り状態が長時間続き粘着状態になかなか戻せないことを図 22 及び図 23 に示す。

4. まとめ

静的な非線形テーブルに基づく再粘着制御系を 1 軸電気車電気車モデルに適用し、接線力特性を車輪 - レール間の相対すべり速度で決まる特性を持つと仮定し、数値計算により再粘着動作させた。

その結果、再粘着に成功する場合はモータ指令トルク - 滑り速度の軌跡がリミットサイクルを描く動作である。再粘着に失敗する場合の動作はモータ指令トルクが瞬間接線力係数と比して大きい値に収束してしまい、空転速度が発散してしまう動作である。

さらに、制御器定数であるトルク絞込み加速度偏差余裕 α_0 、トルク絞込み加速度偏差幅 α_w の 2 変数について感度解析を行った。この結果、限界粘着係数を小さくするには α_0 を小さくすれば良いことを確認した。しかし、現実には

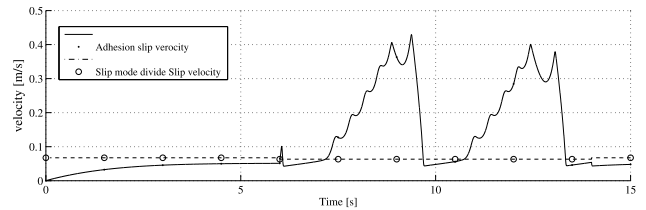


図 22 $\alpha_w = 0.2, \mu_{lim} = 0.16$ での滑り速度 時間特性
Fig. 22. The $v_s - t$ characteristic in success readhesion at $\alpha_w = 0.2, \mu_{lim} = 0.16$

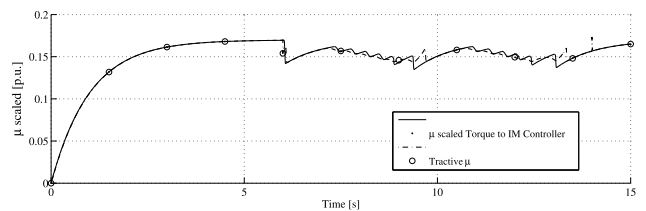


図 23 $\alpha_w = 0.2, \mu_{lim} = 0.16$ での瞬時接線力係数 時間特性
Fig. 23. The time characteristic of tractive μ and torque to IM at $\alpha_w = 0.2, \mu_{lim} = 0.16$

下り勾配で加速度偏差が正にバイアスされることを考慮し、 α_0 の余裕を持たせる必要があると考えられる。また、 α_w に関して α_0 と同じ傾向であるがそれに比べ感度が高いこと、 α_w が大きいと微小な粘着悪化条件のもとで再粘着させにくいことが分かった。

今後、車体 - 台車系の振動や、複数軸駆動を考慮に入れ検討を進める予定である。

参考文献

- (1) 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
- (2) 鉄道システムにおける粘着制御技術調査専門委員会 編：鉄道車両における粘着制御技術，1999，pp. 28-34
- (3) 大下穂高・川村篤男：粘着試験装置を用いた加速から減速へ連続した接線力係数の測定と最大接線力制御，IIC-07-80，pp. 59-64
- (4) 飯田秀樹・喜多純子・熊野昌義・菊池高弘：ファジィ粘着制御方式の開発，平成 7 電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 197，pp. 269-272
- (5) 門脇 悟志：接線力推定値を用いた電気車の空転滑走再粘着制御に関する研究，2006，p. 21