

空転再粘着制御におけるトルク引き下げ量計算法の一検討

○ [電] 佐藤 正健 [電] 寺本 晃大 [電] 大石 潔 (長岡技術科学大学)

[電・機] 牧島 信吾 上園 恵一 (東洋電機製造) [電] 保川 忍 (元 東洋電機製造)

Command Generation Method for Anti-slip Re-adhesion control.

○ Masatake Sato, Kota Teramoto, Kiyoshi Ohishi (Nagaoka University of Technology)

Shingo Makishima, Keiichi Uezono (Toyo Denki Seizo K.K.), Shinobu Yasukawa

We have already proposed the anti-slip re-adhesion control based on disturbance observer and sensor-less vector control and a method of generating torque command for anti-slip re-adhesion control based on slip acceleration for electric locomotive. This paper discusses anti-slip re-adhesion control for a rolling stock based on the method of generating torque command based on slip acceleration and shows that the anti-slip re-adhesion control gets fine performance by proposed method by the numerical simulation.

キーワード：電車，空転再粘着制御，外乱オブザーバ，すべり加速度

Key Words : train, re-adhesion control, disturbance observer, slip acceleration

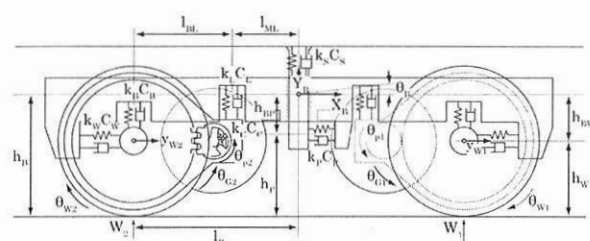
1. はじめに

筆者らは，これまでに速度センサレスベクトル制御と外乱オブザーバによる接線力推定に基づいた電気車の空転再粘着制御を提案してきた。提案された制御方式は，実際の通勤電車において良好な駆動性能が実証されている^[1]。

粘着制御では空転検出後，電動機のトルクに対して一定の比率であったり，接線力推定に基づいたりして，電動機の発生トルクを下げる方法が広く用いられている。これらの手法では空転検出閾値やトルク引き下げ量といった粘着制御の調整パラメータが設定されており，最大限粘着力を有効利用できるようにするためには，試行錯誤的な調整と多くの試験が必要となる。

筆者らは，解析的にトルクの引き下げ量を決める方法として，外乱オブザーバによる接線力の推定値を積極的に使用したトルクの引き下げ量の計算法を提案し，動輪周加速度と車両絶対加速度の相対加速度（すべり加速度）の平均値によって，粘着制御を特徴づけできることを示した。この手法を用いることで，すべり加速度が負となるようなトルク引き下げ量を設計することができ，粘着制御時にすべり速度の減少を保証することができる^[2]。

本論文では，電気機関車を対象としてこれまで検討が行われていたすべり加速度に基づくトルク引き下げ量の計算法が，一つのインバータで複数の電動機を駆動することが



(a) カルダン台車モデル



(b) 1M1T 通勤台車モデル

図1 車体と台車の運動モデル

一般的な動力分散型電車でも有効であることをシミュレーションによって示す。

2. 空転再粘着制御系の構成

2.1. 1M1T 通勤電車のダイナミクス

計算機シミュレーションに用いる1M1T通勤電車モデルを図1に示す。台車振動系のダイナミクスは図1(a)のように軸ばねと枕ばねによる上下方向の変位，軸箱支持装置と台車牽引装置による前後方向の変位，台枠のピッチング角の変位を考慮している。また，図1(b)の示すように車体の

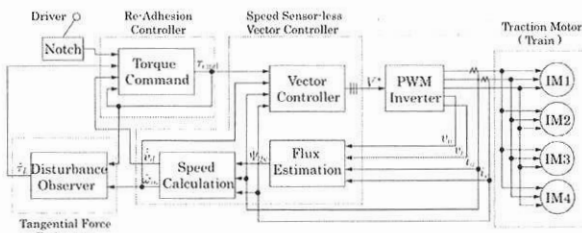


図2 再粘着制御系の全体構成

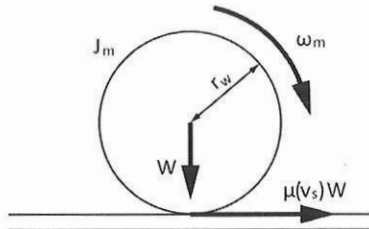


図3 一動輪モデル

上下振動，前後振動，ピッチング振動を台車振動系と同様に考慮している。付随車は質点として扱い，電動車と付随車の間に生じる振動系は，車両同士の相対運動方程式から導出している。

2.2. 外乱オブザーバを用いた空転再粘着制御

再粘着制御系の全体構成を図2に示す。電動機制御系は図2に示すようなIC4Mの制御系を想定し，速度センサレスベクトル制御^[1]と，たすき掛け電流制御^[3]によって駆動する。

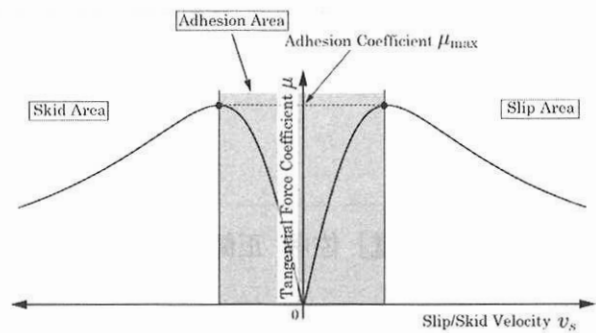
電車編成は電動車と付随車の力学系でモデル化されるが，再粘着制御に使用する外乱オブザーバのモデルは，図3のような一動輪軸に換算したモデルで表現する。一動輪軸換算における電車の電動機の運動方程式を(1)式に示す。負荷トルク τ_L を推定する外乱オブザーバは(2)式で表される。(2)式における電動機から見た駆動系全体の慣性モーメント J_m は(3)式から求めることができる。また，動輪の負荷トルク τ_L は接線力を用いて(4)式のようにも表すことができる。各記号を以下に示す。 J_m ：電動機から見た駆動系全体の慣性モーメント， J_R ：電動機ロータの慣性モーメント， J_w ：動輪の慣性モーメント， τ_m ：電動機の発生トルク， τ_L ：電動機の負荷トルク， ω_m ：電動機の角速度， $\mu(V_s)$ ：接線力係数， V_s ：動輪速度と車両速度の相対速度（すべり速度）， W ：軸重， r_w ：動輪半径， R_g ：歯車比， s ：ラプラス演算子。なお，本論文において外乱オブザーバの極は $a=100[\text{rad/s}]$ とした。

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = \tau_m - \tau_L \quad \cdots (1)$$

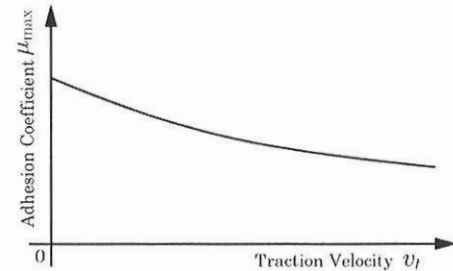
$$\hat{\tau}_L = \frac{a}{s+a} (\tau_m - J_m s \omega_m) \quad \cdots (2)$$

$$J_m = J_R + \frac{J_w}{R_g^2} \quad \cdots (3)$$

$$\tau_L = \frac{1}{R_g} \mu(V_s) W g r_w \quad \cdots (4)$$



(a) すべり速度に対する接線力係数の特性



(b) 車両速度に対する粘着係数の特性

図4 動輪とレールの間の粘着特性曲線

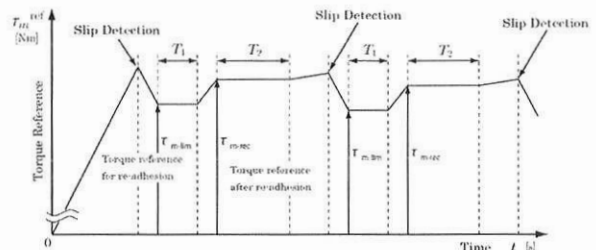


図5 空転再粘着制御のトルク指令パターン

図4に鉄道車両の粘着特性を示す。図4(a)は接線力係数と動輪すべり速度の特性曲線を示しており，接線力係数はあるすべり速度で最大となり，この時の接線力係数を粘着係数という。この粘着係数は図4(b)に示すように走行速度が上がるにつれて小さくなる性質を想定している。

力行時の空転再粘着指令トルクパターンを図5に示す。空転を検知すると，外乱オブザーバによって空転検知時の動輪の負荷トルクを推定し，負荷トルクの推定値 $\hat{\tau}_L$ を用いて決定される τ_{m-lim} までトルク指令値を引き下げ，一定時間維持することで空転した動輪を粘着状態に戻す。その後，トルク指令値を τ_{m-rec} まで引き上げる。

2.3. すべり加速度に基づくトルク引き下げ量の計算法

粘着制御では，空転の検出後に電動機の発生トルクを引き下げの方法が広く用いられている。これは，電動機のトルクを引き下げることで動輪周加速度が減少し，すべり加速度 $\dot{V}_s$ が負方向を向くことにより，すべり速度が減少し，接線力係数が空転領域から粘着領域へ遷移させるためである。図3の一動輪モデルに基づく，すべり速度の増大を抑制することのできる発生トルクは，車両の加速度 $\dot{V}_t$ を用いて(5)式で表される範囲にある。(5)式は，(1)式を変形し，

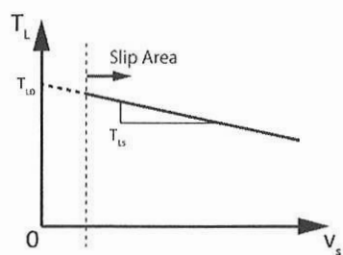


図6 接線力の線形近似

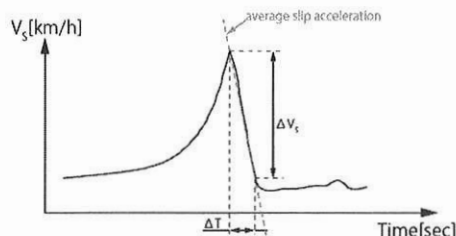


図7 すべり速度の変化

すべり加速度が負となる条件から導かれる。

$$\tau_m < \tau_L + J_m \frac{R_g}{3.6r_w} \dot{V}_t \quad (5)$$

負荷トルク τ_L と車両加速度 $\dot{V}_t$ が把握できるとすれば、すべり加速度を指令値として与えることで、(5)式を満たすトルクの指令値を(6)式のように計算することができる。

$$\tau_m^{ref} = \tau_L + J_m \frac{R_g}{3.6r_w} (\dot{V}_t + \dot{V}_s^{ref}) \quad (6)$$

(6)式は、空転によるすべり速度の増大を抑えるために十分なトルクの引き下げ量をすべり加速度 $\dot{V}_s^{ref}$ の値によって、任意に決定できることを示している。

次に図5のトルク指令パターンに基づいて粘着制御を行うことを考える。空転領域における接線力を図6のように近似し、空転を検出した瞬間のすべり速度を V_{s0} とすると、トルクを引き下げている間のすべり速度の変化は(7)式ようになる。

$$V_s(t) = V_{s0} + \frac{K}{T_{Ls}} \dot{V}_s^{ref} \left(1 - e^{-\frac{T_{Ls}t}{K}} \right) \quad (7)$$

$$K = J_m \frac{R_g}{3.6r_w}$$

ここで、トルクを t_1 秒間引き下げた時のすべり速度を V_{s1} とし、平均のすべり加速度を(8)式のように定義する。

$$\bar{\dot{V}}_s = \frac{\Delta V_s}{\Delta t} = \frac{V_{s1} - V_{s0}}{t_1} \quad (8)$$

(7)式に基づいて、トルク引き下げ後のすべり速度の変化が任意の値となるためのパラメータ $\dot{V}_s^{ref}$ の値は(9)式ようになる。

$$\dot{V}_s^{ref} = \frac{T_{Ls}}{K} \frac{\Delta V_s}{1 - e^{-\frac{T_{Ls}t}{K}}} \quad (9)$$

提案法に使用する負荷トルクは、外乱オブザーバを用いることで空転検出時の値を得ることが可能である。ただし、1C4Mで制御される場合、得られる負荷トルクは電力変換

表1 電車モデルに適用したパラメータ

	記号	値	単位
駆動系全体の慣性モーメント	J_m	3.863	kg m ²
動輪半径	r_w	0.43	kg m ²
歯車比	R_g	6.07	-
電動車重量	-	40	ton
付随車重量	-	30	ton
最大加速度	-	2.5	km/h/s

表2 設計パラメータ

	記号	値	単位
トルク維持時間	Δt	150	msec
接線力の傾き	T_{Ls}	-116.63	Nm/(km/h)

機で制御する電動機の平均的な負荷トルクになる。

車両加速度については、絶対加速度を得ることが望ましい。しかしながら、実用上、絶対加速度を得ることは困難である。そのため本論文では、粘着領域ではすべり速度の変化が限りなくゼロに近く、空転領域では急峻に変化するという仮定の下で、空転による動輪加速度の変動分を移動平均フィルタによって除去することによって得る。

3. シミュレーションによる検証

検証に用いる電車モデルの各定数を表1に示す。また、トルク引き下げ量の設計に用いるパラメータを表2に示す。

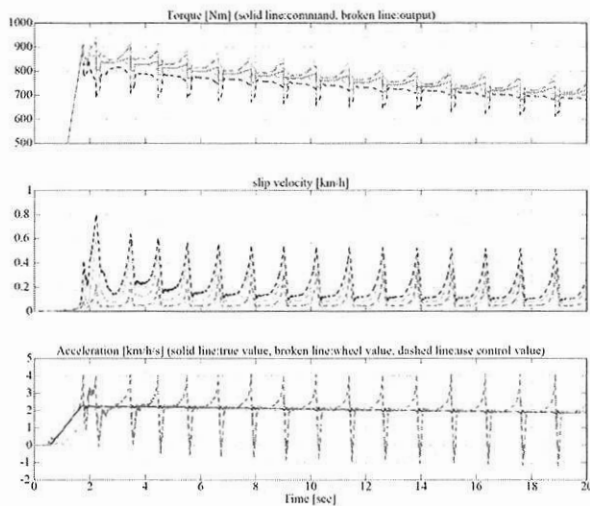
提案法を検証するためのシミュレーションでは、粘着特性は図4のモデルを使用し、力行シミュレーションを行う。

図8に粘着係数12%において、すべり加速度を3km/h/sとなるようにトルクの引き下げ量を設計し、再粘着制御シミュレーションを行った結果を示す。

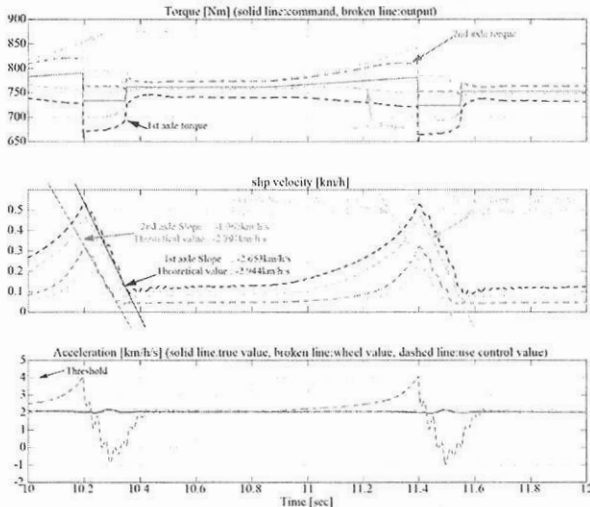
トルク引き下げ後のすべり速度の変化が(7)式に従うとすると、各動輪の空転を検出した瞬間のすべり速度 V_{s0} からすべり速度0.1km/hまで、もしくはトルク維持時間でのすべり速度 V_{s1} を結んだ直線の傾きを理論的に求めることができる。各動輪の理論計算結果とシミュレーション結果から求めた傾きを、図8に記入する。それぞれがほぼ理論値と一致することがわかる。

シミュレーションモデルは車両内の軸重移動を再現している。そのため、軸重移動によって各動輪のレールとの接線力に差が生じ、各動輪の空転の進捗に差が発生する。1C4Mで電動機が制御される場合、電力変換機の発生する一つの制御電圧で四つの誘導電動機が制御されるため、各動輪の空転状況に応じて各誘導電動機のすべりが変化する。そのため、四つの動輪の中で空転の進行している動輪に接続された電動機の発生トルクは、電動機内のすべりが増加するため減少し、空転の進行していない動輪に接続される電動機は、すべりが減少するため発生トルクが増加する。

トルクの引き下げ量は各電動機に発生する平均的な負荷トルクを用いて生成しているが、電動機内のすべりによる



(a) Time 0-20sec



(b) Time 10-12sec

図 8 提案法による空転再粘着制御シミュレーション
(粘着係数: 12%, すべり加速度: -3km/h/s)

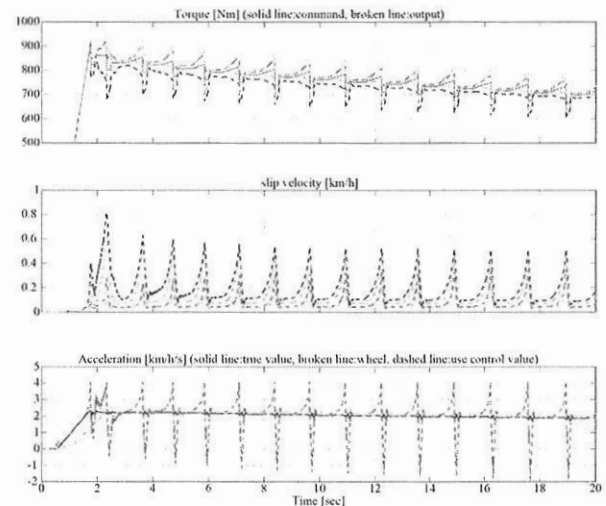
トルクの指令値に対する変動分と動輪に生じる接線力の平均値に対する変動分が相殺され、各動輪が (6) 式で指令されたすべり加速度で動作する。そのため、図 8 のように各動輪の平均のすべり加速度が理論値とほぼ一致するのである。

また、図 9 のように、すべり加速度を -4km/h/s となるように設定した場合でも同様に各電動機が制御され、各動輪の平均のすべり加速度が理論値とほぼ一致する。

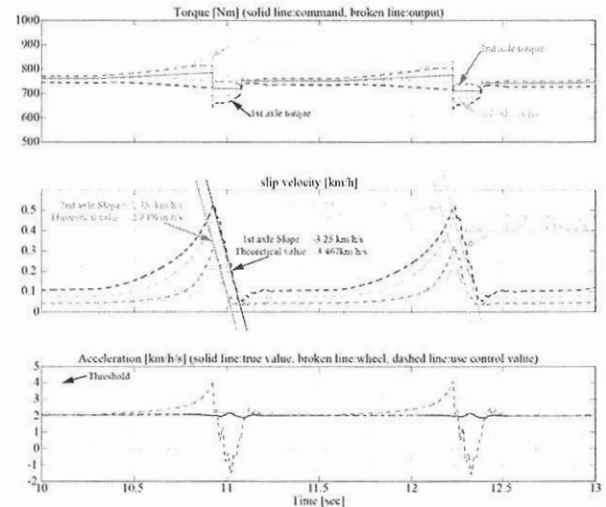
以上のシミュレーション結果から、すべり加速度によるトルク引き下げ量の計算法は、1C4M で駆動する電車に適用することが可能であり、有効であることが示された。

4. まとめ

本論文では、すべり加速度に基づくトルク引き下げ量の計算法の 1C4M の電動機並列駆動を想定した電車モデルへの適用検討を行った。各シミュレーション結果から、1C4M で駆動する電車においては、所望のすべり加速度を得るようにトルクの引き下げ量を設計することで、制御される全ての動輪の平均のすべり加速度が理論値とほぼ一致するように動作するということが示された。



(a) Time 0-20sec



(b) Time 10-12sec

図 9 提案法による空転再粘着制御シミュレーション
(粘着係数: 12%, すべり加速度: -4km/h/s)

以上のように提案法を用いることで、試行錯誤的な調整を必要とせずに、粘着制御の特徴を決めることができるようになり、また空転検出時のすべり速度を見積もることが出来れば、空転検出後、確実に動輪を再粘着させることができるようになる。

参 考 文 献

- 1) 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 番代電車における実例…」, 電学論 D, 124, 9, pp.909-916 (2004-9)
- 2) 佐藤正健・大石 潔・牧島信吾・上園恵一・保川 忍: 「すべり加速度に着目した空転再粘着制御の一検討」, 交通電気鉄道 / ITS 合同研究会 (2011-11)
- 3) 牧島信吾・上園恵一・永井正夫: 「電圧飽和状態における電動機制御応答特性の検証および考察」, 電学論 D, 130, 5, pp.663-670 (2010-05)