

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

空転の状態判断を早めて 加速力を向上する

電気車では、通常、主電動機回転子の回転速度や回転加速度の情報を用いて、空転を防止（空転制御）しています。これらの情報は、ノイズによる空転誤検知を防止する観点から平滑化処理が施されて用いられます。しかし、平滑化すると情報伝達に遅れが生じるため、空転制御性能が十分得られず、加速力が低下し、必要な速度に達する時間が延びる場合もあります。そこで、平滑化処理を変更して情報伝達の遅れを小さくした加速度情報を併用する再粘着制御方法を開発しました。ここでは、開発した制御方法について紹介します。



山下 道寛
Michihiro Yamashita
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
主任研究員
【専門分野】電気車制御、
再粘着制御

はじめに

鉄道車両は、車輪とレールとの転がり摩擦力（一般に粘着力と呼ぶ）を利用して駆動力を得ています（図1）。鉄道車両の転がり摩擦係数は、自動車のゴムタイヤと舗装路面の転がり摩擦係数に比べて小さく、急発進や急制動時に、車輪の空転や滑走を引き起こしやすくなります。とくに雨天時には転がり摩擦係数が大きく低下するため、レール上において空転や滑走が発生しやすくなり、十分な駆動力が得られないことがあります。また、大きな空転

が発生した時には、車輪がレールを削ってしまうこともあり、レール保守頻度が増えてしまいます。

インバーターで制御される電車と電気機関車（以下、電気車）の空転防止方法では、一般的には、空転を検知したら空転が拡大しないように、速やかに主電動機トルク（以下、トルク）を低減して空転を防止します。

しかし、トルクを低減することで、空転の発生は抑制できますが、余分にトルクを低減しすぎると、列車加速力や貨車けん引力が十分に発揮できず、

ダイヤ遅延の要因につながります。その対策としては、電動車比率（☞参照）を高めることや砂まきが有効ですが、初期コストが高くなります。そのため、トルク制御による安定した駆動力確保が重要です。

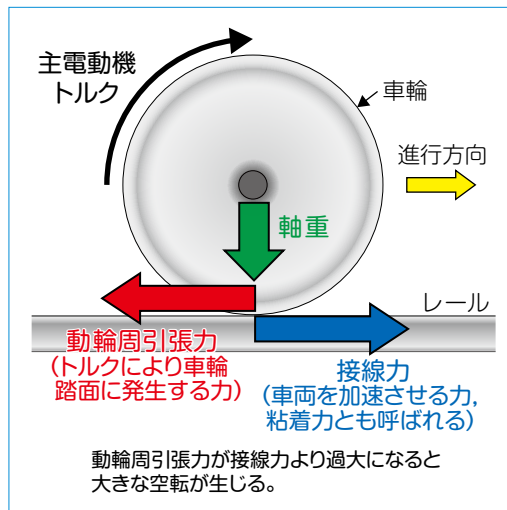


図1 車輪・レール間に働く力

☞ 電動車比率

電動車と付随車の比率を意味します。また、MT比と呼ぶこともあり、値が大きいほど編成全体の電動車の割合が大きくなります。

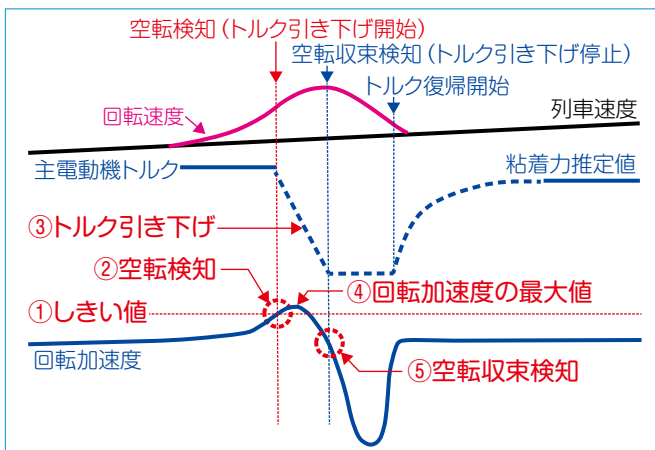


図2 空転検知とトルクの引き下げ

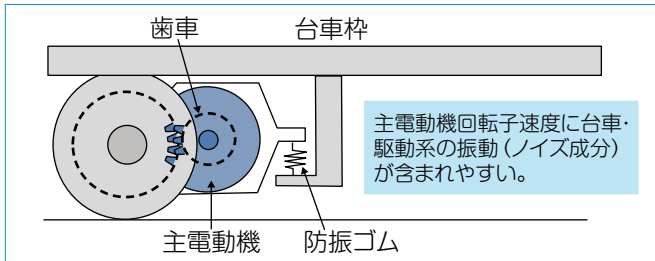


図4 電動台車(吊りかけ式)の構造

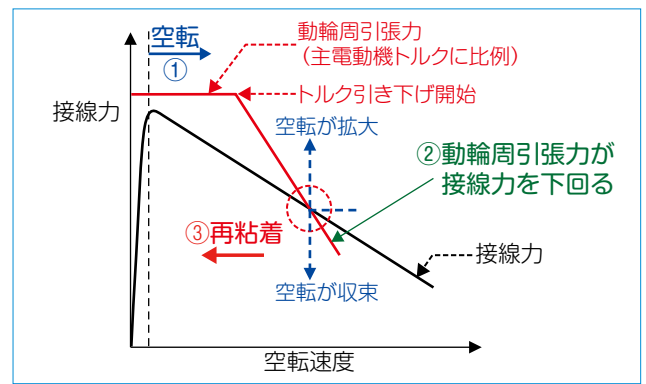


図3 接線力と動輪周引張力の関係

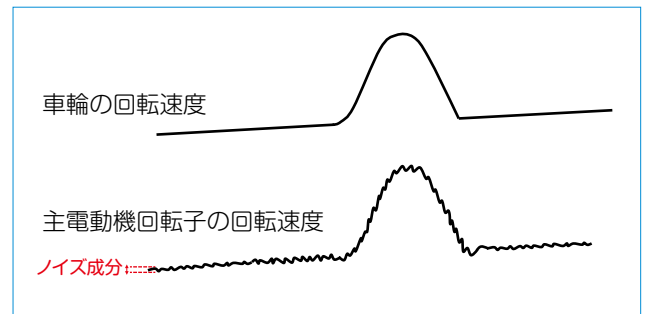


図5 車輪回転速度と主電動機回転速度のイメージ

電気車の空転防止

電気車の空転時のトルク制御方法(再粘着制御と呼ぶ)の概要を以下に述べます(図2)。

空転の発生については、主電動機回転子の回転速度や加速度情報を用いて検知しています。回転速度や加速度がしきい値(図2①)を超過したときに空転と判断(空転検知, 図2②)し、再粘着させるために主電動機トルクを引き下げます(図2③)。その後、回転加速度がほぼ最大値(図2④)となり列車加速度よりも回転加速度が下回ったときに空転が収束し始めたと判断(空転収束検知, 図2⑤)し、トルクを引き下げを終了します。

このときの接線力と動輪周引張

力(参照)の関係を図3に示します。図3において、①で空転が発生すると、接線力の負勾配特性により、主電動機トルクがそのままでは空転が拡大していくため、回転加速度などから空転を検知し、主電動機トルクを引き下げを行う必要があります。そして、主電動機トルクを引き下げ後、動輪周引張力が接線力を下回る(図3②)と、空転加速度が列車加速度以下となり、再粘着に向けて収束を開始することになります(図3③)。その後、主電動機トルクを短時間保持し、元のトルク値に復帰させる動作が行われます。

速度に含まれるノイズ

空転検知に用いる主電動機の回転加速度の算出方法とその特性について以下に述べます。

インバーター制御の電車では、主電動機端回転子の回転速度と回転加速度が制御装置内で演算され、再粘着制御に用いられます。電気機関車で主に用いられている電動台車(吊りかけ式)の構造を図4に示します。主電動機は

台車枠と車軸で支持されていて、走行中には、レール継ぎ目などにより生じる台車振動や歯車同士のかみ合い振動などから生じる振動が主電動機を加振させるため、主電動機回転子速度に車輪の回転成分以外の振動成分(以下、ノイズ成分)が含まれます(図5)。

主電動機回転子の回転加速度は、回転速度から近似微分演算により算出されます。微分するとノイズ成分は増大する傾向にあるため、ノイズにより空転が誤検知されやすくなります。これを防止するため、信号を平滑化してできるだけノイズ成分を減衰させる必要があります。

平滑化手法としては、移動平均法や一次遅れローパスフィルターなどが広く用いられています。以下では、移動平均法について説明します。

移動平均法はノイズを除去するのに最も簡単な方法です。決められた数の連続データの平均値を求めることで、信号が平滑化されます。図6に平滑動作例を示します。平均前のサンプリングごとの信号を▲で表し、直前の連続し

接線力

車輪・レール間の接線方向に働く力であり車両を推進する力となります。

動輪周引張力

原動機のトルクから動力伝達機構の損失を差し引いた車輪踏面に発生する力、引張力とも呼ばれています。

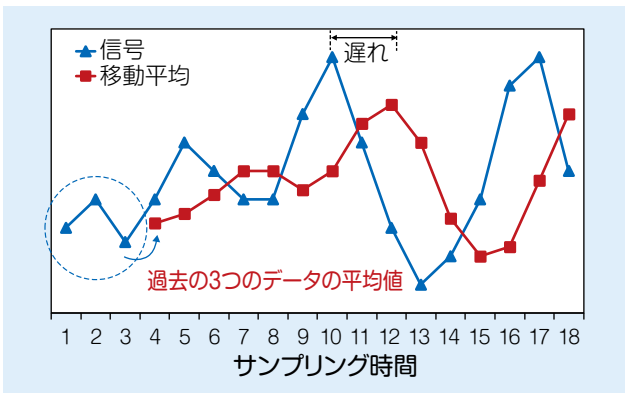


図6 移動平均による平滑化

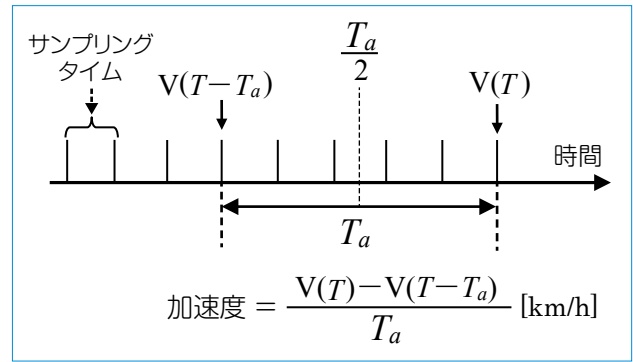


図7 加速度の算出

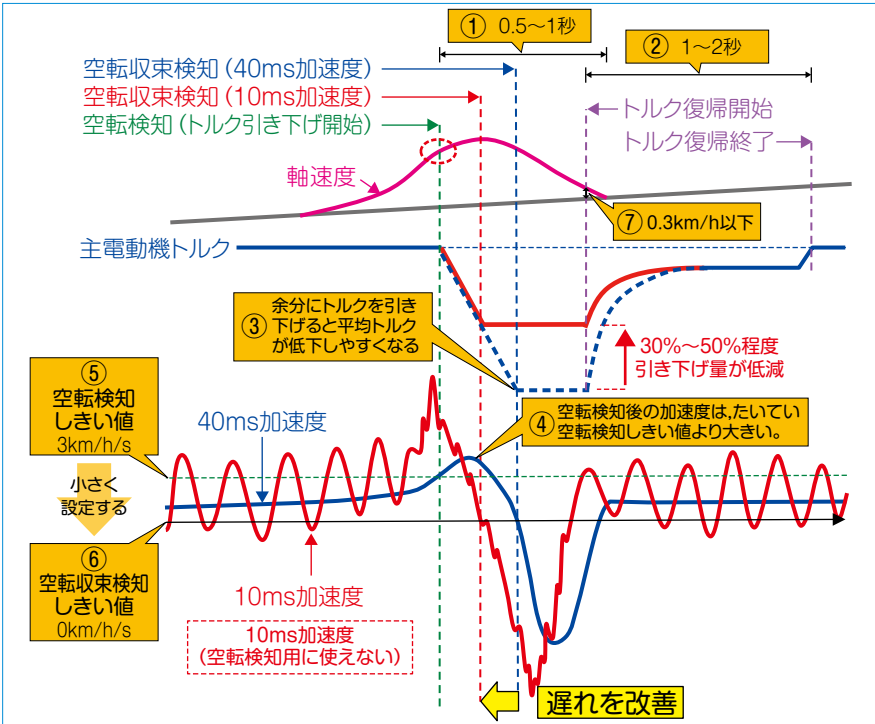


図8 再粘着制御の主電動機トルク動作

た過去3つの▲値の平均値を■で示します。ここで、横軸はサンプリング数(時間)を表します。信号■は、▲よりも遅れて平滑化された波形となります。

平均化するサンプル数(時間幅)を多くするとノイズ成分は大きく減衰して空転を誤検知しにくくなりますが、

PGセンサー

鉄道車両の主電動機制御に用いられる速度センサーです。一回転ごとに決まった数のパルス(電圧)を発生します。そのパルスの間隔などを時間計測することで、回転速度が演算できます。高周波式、電磁誘導式などセンサー方式があります。

実際の車輪の加速度変化に対して遅れが大きくなるため制御性能の低下につながります。

速度と加速度の算出

再粘着制御に用いる速度情報は、主電動機制御に用いられているPG(パルスジェネレーター)センサー信号(参照)から求められます。また、最近では、PGセンサーを用いない主電動機制御(速度センサレスベクトル制御)方法も開発され、電流と端子電圧などから精度よく速度推定値が求められています。

空転再粘着制御に用いる場合には、これらの速度信号に対し、平滑化処理

表1 加速度算出時間

10ms 移動平均・加速度算出時間	
ノイズ	影響受けやすい
空転検知	適さない(誤検知しやすい)
遅れ	10ms
40ms 移動平均・加速度算出時間	
ノイズ	影響受けにくい
空転検知	適している(誤検知しにくい)
遅れ	40ms

が行われます。

今回は、移動平均処理を用いて説明します。移動平均時間幅 T_a とすると、速度算出による遅れ時間はその半分の $T_a/2$ となります。

回転加速度は、現在の移動平均速度 $V(T)$ と移動平均時間幅 T_a だけ前に算出した速度 $V(T-T_a)$ から算出することとします(図7)。この場合の加速度算出による遅れは T_a となります。加速度算出の時間幅は、加速度の算出誤差を小さくするため、速度の移動平均時間と同じ値で算出しました。これにより、加速度信号の遅れは移動平均時間幅と同じ T_a となります。

以降では、「XXms 加速度」は、そのXXms 移動平均速度から時間幅XXmsで算出された加速度を意味することとします。

提案した再粘着制御方法¹⁾

空転を検知してから再粘着制御によるトルク引き下げ動作により再粘着するまでの時間は0.5~1秒程度です



図9 散水空転試験風景

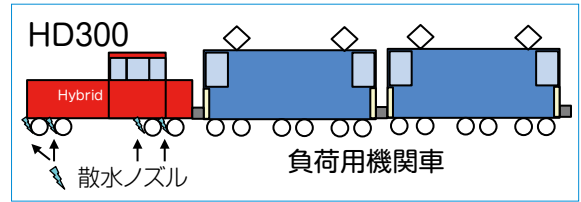


図10 試験用入換機関車HD300と負荷用機関車

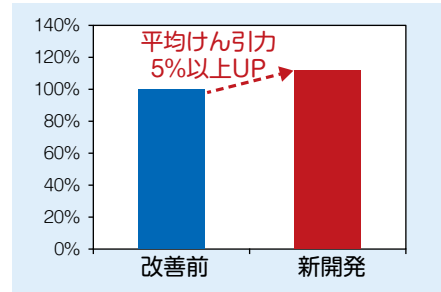


図11 平均けん引力比較(0-10km/h)

(図8①)。再粘着後に復帰動作に1~2秒ほどかかるため(図8②)、余分なトルクの引き下げは平均トルク低下につながります(図8③)。また、余分にトルクを引き下げると、再粘着した瞬間に、動輪周引張力と接線力の差が大きくなる場合があります、これにより車両に大きな振動が発生しやすくなるため、他軸に空転が誘発される要因となります。

空転検知後の加速度は、たいてい空転検知しきい値よりも大きくなります(図8④)。空転収束検知しきい値は空転検知しきい値よりも小さく設定する必要があるため(図8⑤⑥)、加速度信号のノイズ成分は、空転検知前の加速度信号よりも大きく許容できます。

そこで、空転収束検知に使用する加速度信号に、空転検知に用いた加速度情報よりも遅れの小さな加速度情報を用いる制御方法を提案しました。ここでは試験用入換機関車で実施した場合を例に説明します。

空転検知しきい値は40ms加速度が3km/h/s(図8⑤)、空転収束検知は10ms加速度が0km/h/s以下(1,000t程度のけん引列車では車両加速度は0.5km/h/s程度とほぼゼロに近い)ため検知するように設定しました(図8⑥)。そして、空転収束検知後にトルクを一時的に保持し、再粘着と判断できる速度差(0.3km/h以下)を検

知すると(図8⑦)、空転検知時の粘着力に相当するトルクに復帰させます。

空転制御に用いる10ms加速度と40ms加速度の特徴を表1に示します。空転検知用には40ms加速度信号を用いています。主電動機トルクの引き下げ傾きは急峻なため、加速度情報の遅れは余分なトルクの引き下げにつながり、平均けん引力の低下や再粘着時の車体振動を引き起こし、空転していないほかの軸の空転を誘発する要因となります。

空転収束検知に10ms加速度を使用すると、40ms加速度よりも遅れが30ms改善できるため、起動トルクに対する余分な引き下げ量を30~50%程度に低減することが期待できます。

けん引性能試験結果¹⁾

試験用入換機関車(図9, HD300)に、負荷用機関車を連結した状態で走行試験を実施しました。負荷貨車1,000t相当を模擬するために負荷用機関車にブレーキ力を与え、試験用入換機関車の各車輪には、レール湿潤状態を模擬するため散水してけん引力を確認しました(図10)。

けん引走行試験の結果を図11に示します。空転検知用と空転収束検知用に加速度を分けて使用した結果、速度

0から10km/hまでの平均けん引力が、改善前よりも向上することが確認できました。

まとめ

空転検知用に用いる加速度信号よりも遅れの小さな加速度信号を空転収束検知用に用いることで、再粘着制御時のトルク引き下げ量が低減され、起動時のけん引力が向上しました。

提案した制御方法は、2014年以降、ハイブリッド入換機関車HD300形式量産機に導入されています。また、最近では、本制御が電車にも採用され始め、列車加速度と乗り心地の向上に貢献しています²⁾³⁾。[RRR]

文献

- 1) 山下道寛, 添田正: インバータ制御式入換機関車の起動けん引力を向上する再粘着制御方法, R&M, Vol.24, No.2, pp.44-48, 2016
- 2) 島田直人, 山中章広, 北村琢也, 山下道寛, 三木真幸, 大江晋太郎: 空転再粘着制御の性能向上—早期の空転収束検知と電流差検知を用いた乗心地の改善—, 第52回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, No.501, 2015
- 3) 鉄道総合技術研究所: 電車の新たな空転制御方法を開発(プレスリリース 2017/8/21), http://www.rtri.or.jp/press/index_2017.html