

空転再粘着制御

山下 道寛(総務部 人事(前 車両制御技術研究部 駆動制御))

はじめに

鉄道車両は、鉄車輪と鉄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。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易くなります。特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。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るなどコスト面でもマイナスです。そこで、レール保守を低減させるとともに、車両を加速させるために必要な粘着力を有効に利用するために、空転した車輪を再粘着させる駆動制御が必要となります。この制御を空転再粘着制御と言います。電気車と気動車の動力車が対象ですが、本稿では電気車を中心に述べます。

空転とは

図1は原動機により車輪踏面のレール方向に動輪周引張力が働き、その反力として伝達力(車両を加速させる力)を得ている様子を描いています。また、車輪踏面に働くレール方向の伝達力を軸重で除した値として、伝達力と軸重の

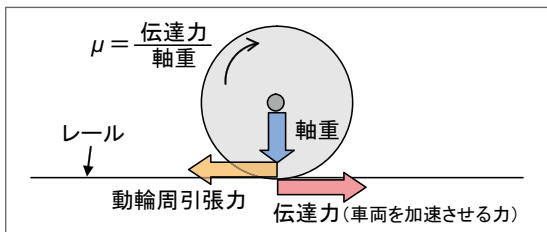


図1 車輪・レール間に働く伝達力

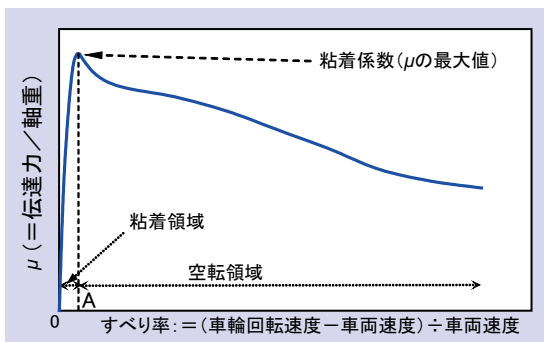


図2 すべり率と μ (=伝達力/軸重)の関係

比(以下では μ = (伝達力/軸重)とする)を表記しておきます。軸重の何%の伝達力を出しているかを表し、値が大きくなるほど滑りやすくなります。

図2は定性的に示した μ とすべり率(車輪回転速度から車両速度を引いた値を車両速度で除した値)の関係を示しています。 μ の最大値を粘着係数と呼びます。車輪・レール間の状況によりますが、粘着係数を与えるすべり率は1%以下の場合が多いです。図中ではすべり率に対する μ について示しています。すべり率が0からA点に達するまでは車輪は空転しておらず、この状態を粘着しているといえます。この領域は粘着領域となります。すべり率がA点を超えると空転領域となります。

空転領域では、通常 μ はすべり率に対して負勾配をとるため、車輪の空転速度が増加します。つまり、動輪周引張力 \gg 伝達力となると、車輪を回転させる力(=動輪周引張力-伝達力)が大きくなり、これにより車輪が空転します。利用できる伝達力が小さくなった場合には、動輪周引張力を下げなければ、空転は収束しないこととなります。

空転再粘着制御

(1)再粘着制御の必要性

軸重を一定としたとき粘着係数を超える伝達力を得ることは不可能です。粘着係数ぎりぎりまで伝達力を得ることができれば、理想的です。しかし、滑るか滑らないかの状態では、空転する確率が高くなります。空転すると得られる伝達力は小さくなり(図2)、そのまま何もしなければ動輪回転速度は急上昇しますので、空転と判断したら速やかに主電動機電流(トルク)を引き下げ、再粘着させる必要があります。これを再粘着制御と言います。このとき、どのタイミングで引き下げるか、どれくらい引き下げるかは、高い伝達力を得るための大きなポイントの一つです。

(2)空転検出における速度演算の重要性

抵抗制御車の場合には、空転した軸の主電動機電圧や電流が変動することを利用して、自軸の電圧・電流の変化率や他軸の電圧・電流との比較により空転を検出していました。最近のインバータ制御車では、主電動機回転子軸端に速度センサとしてパルスジェネレータ(以下PGセンサ)が装備され、主電動機(誘導電動機)制御と空転再粘着制御等に用いられています。

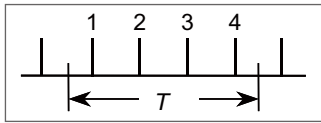


図3 一定時間パルス計数方式

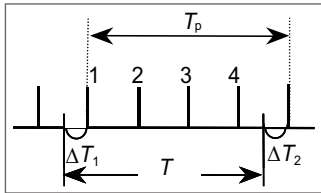


図4 平均パルス幅演算方式

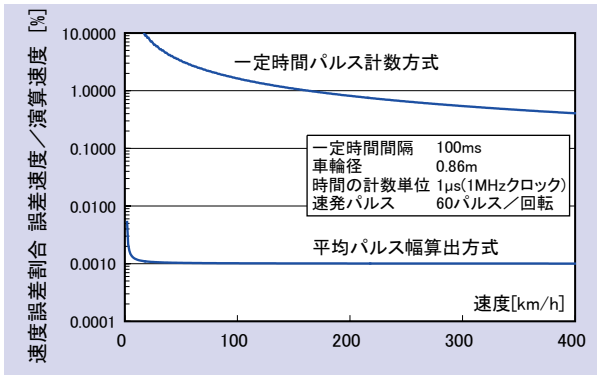


図5 速度誤差例

空転検出には、速度と加速度を観測し、ある閾値を超えたときに空転と認識するのが一般的です。速度センサのパルス数は電動機1回転当たり60～90パルス程度です。一般産業用に比べ、分解能が低く、速度演算の際には工夫が必要です。

一般的な速度演算方法としては、一定時間 T 内に何パルス入ったかを数えて速度を算出する一定時間パルス計数方式があります(図3)。この方法では、低速度域で速度誤差が大きくなります。最近用いられる方法として、平均パルス幅演算方式があります。これは図4のように一定時間 T をもとにパルス入力までの時間 ΔT_1 、 ΔT_2 を計数し、パルス数 n とそれらのパルス列全体の幅 T_p より平均パルス間隔を求めて速度を算出します。このようにすることで誤差の少ない正確な速度が得られます。

図5には一定時間パルス計数方式と平均パルス幅演算方式を用いた場合の実速度に対する誤差割合の例を示します。低速域では一定時間 T 内に含まれるパルス数が減るため誤差が大きくなり、速度を正しく捉えることができません。一定時間 T を大きくすると誤差が少なくなりますが、実速度に対する演算速度の時間遅れが大きくなります。これに対し平均パルス幅演算方式ではほとんど速度誤差が無いことが分かります。速度が正確に算出できないと加速度も正確に求められません。素早く空転を検出するためには、時間遅れが少ない正確な速度の把握が必須です。

最近、速度センサを用いずに主電動機制御を行う速度センサレスベクトル制御が開発されました。しかし、速度演算に主電動機電圧と電流情報等を用いるため、脈動分やノイズを除去するフィルタによる時間遅れやセンサ測定誤差の影響があります。電動車比率の高い電車のように、粘着

力に余裕のある通勤電車や路面電車に採用されています。

(3) 高い伝達力を得るために(電流復帰)

再粘着制御の性能を決めるもう1つのポイントは、主電動機電流(トルク)の復帰のさせ方です。空転検出後に電流を引き下げ、再粘着した後も引き下げたままにしておくと、高い伝達力が得られません。そこで、再粘着後は再空転しない範囲でできるだけ早く電流を復帰することが望ましいです。最近では、空転検出時に μ を推定し、復帰の際の電流目標値を与える粘着力推定制御が提案され、平均的な伝達力をより高く維持できるようになりました。

(4) 大きなすべりを許容する制御

大きなすべり率を許容すると、摩擦によって車輪・レール間にある水の粘性が低下することで、伝達力が向上する場合があります。ヨーロッパでは積極的に大きなすべり率を許容することによって、少しでも大きな伝達力を得る試みがなされていました。ただし、車輪とレールの損耗の面からは注意が必要です。

(5) 機械系を考慮した制御

空転再粘着制御の動作周期や電動機トルク変動によって、台車や車体の振動を誘発する場合があります。このとき振動により軸重が変化するため、各軸が空転しやすくなり、伝達力が低下する現象が報告されています(図6、図7)。伝達力向上のために、このような機械系も念頭においた制御は有効です。

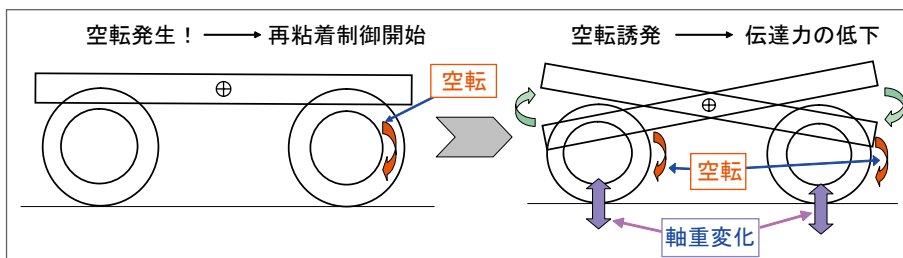


図6 空転再粘着制御による軸重変化

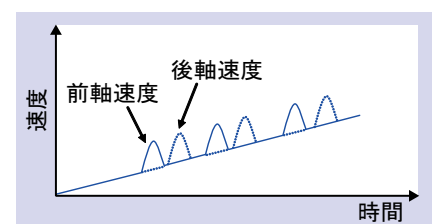


図7 ある軸の空転が他軸の空転を誘発させる様子