

架線・パンタグラフ間の接触力を制御する

山下 義隆
 鉄道力学研究部
 (集電力学研究室 副主任研究員)

池田 充
 同
 (同 室長)



やました よしたか いけだ みつる

はじめに

パンタグラフは架線からの電力を車両へ供給するための装置で、架線とパンタグラフが走行中に常に接触することによって安定した電力供給が可能となります。パンタグラフには押上機構と呼ばれるパンタグラフを架線へと押し付けるための機構が設けられています。押上機構により発生する、架線にパンタグラフを押し付ける力を静押上力と呼びます。静押上力は架線の高さによらずほぼ一定で、車両が停車している間は架線・パンタグラフ間の接触力は静押上力とほぼ等しくなります。しかし、車両の走行による架線の振動やパンタグラフへの空気力の作用などによって、架線とパンタグラフ間の接触力は変動します。過大な接触力が作用した場合、パンタグラフは架線を大きく押し上げることになり、架線押上量の目安値超過や、最悪の場合には架線の断線事故につながることも考えられます。接触力が非常に小さくなり零に達すると、架線とパンタグラフの接触状態が維持できずに「離線」が発生します。離線が発生すると、架線・パンタグラフ間で生じるアーク放電による架線およびパンタグラフの損傷や電力供給の寸断などにつながる恐れがあります。このことから、架線・パンタグラフ間の接触力変動は小さい方が望ましいことがわかります。

そこで、ここでは、架線・パンタグラフ間の接触力変動を低減するための一つの手法として鉄道総研が実施しているアクティブ制御技術を適用したパンタグラフについて紹介します。

アクティブ制御パンタグラフ

パンタグラフのアクティブ制御に必要な機器は、制御力を制御対象であるパンタグラフに作用させるためのアクチュエータ、アクチュエータに指令を与える制御器や制御器が指令値を計算するために必要なパンタグラフの情報を収集するためのセンサなどが挙げられます。

アクティブ制御用パンタグラフを図1に示します。アクチュエータは押上機構と並べて取り付けられています。本稿で紹介するアクティブ制御用パンタグラフでは、アクチュエータとして空気圧シリンダを使用しています。空気圧によって駆動するアクチュエータは、一般的に応答が遅いことが知られていますが、高電圧環境下でも安全な動作を確保するための電気絶縁性を有しています。また、パンタグラフを上昇・下降させるために空気圧機器が既に多用されていることから、アクチュエータの追加設置が容易であるという利点を重視して空気圧シリンダを採用しました。

アクチュエータがどれだけの大きさの制御力を発生させればよいかという指令を出すのが制御器です。制御器は、センサから得られるパンタグラフの情報を元に、あるルールに従って指令をアクチュエータに与えます。このルールを制御則といいます。アクティブ制御によって架線・パンタグラフ間の接触力変動を低減するためにどのような制御則を使うかによって制御効果が大きく異なります。ここでは、PID制御およびインピーダンス制御という2種類の制御則によるアクティブ制御手法を紹介します。

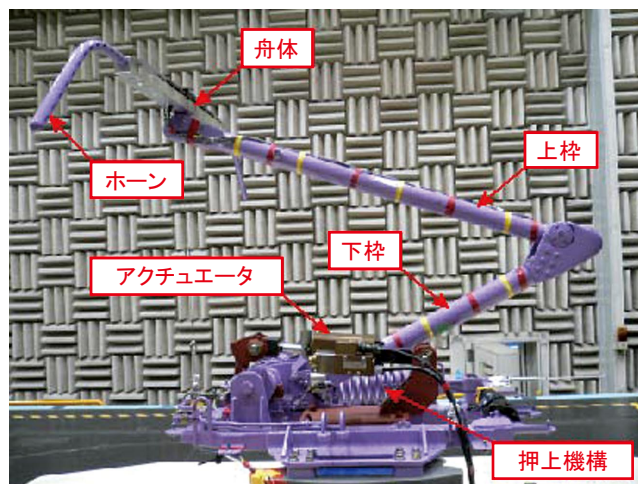


図1 アクティブ制御用パンタグラフ

PID制御

PID制御による接触力変動低減手法では、制御したい接触力を直接測定し、目標とする接触力値との偏差に応じて制御器がアクチュエータへの指令信号を発生します。偏差とは、目標とする接触力からのズレを意味します。PIDの3つのアルファベットは比例 (Proportional)、積分 (Integral)、微分 (Derivative) を意味し、それぞれの要素が偏差に比例した指令、偏差の累積 (積分) 値に比例した指令、偏差の変化速度 (微分値) に比例した指令をアクチュエータに出力します。簡単に比例要素、積分要素、微分要素の効果を説明すると、比例要素は現在の状況に対して制御力を決定し、積分要素は過去の状況に対して制御力を決定し、微分要素は未来の状況を予測して制御力を決定する、という効果があります。比例要素は単純に偏差に比例した指令を出すので、接触力が目標接触力値よりも大きければパンタグラフを引き下げる方向の力を、小さければパンタグラフを押し上げる方向の力を発生させることになります。積分要素は、パンタグラフに定常的な空気力が作用した場合のように、定常的な偏差がある場合に効果を発揮します。微分要素は、偏差の変化速度が大きい場合に大きな出力を発生することになるため、応答性を向上する目的で使用されますが、ノイズなど高周波数成分 (速い変化成分) の信号を増幅させてしまいます。応答性能を超えるほどの高周波数成分の指令がアクチュエータに入力されると、制御の安定性を損なう場合もあるため使用には注意が必要です。

接触力を測定するためのセンサは、パンタグラフの舟体 (図1) 内部に取り付けた加速度計とひずみゲージです。これらの出力から、舟体内部部材の復元力と慣性力の和を求め、接触力の近似値を算出しています。一般的に、加速度計は高周波数の振動成分の感度が高く、しゅう動摩擦によるびびり振動などの影響で、高周波数成分を多く含む接触力信号が制御器に入力されます。したがって、安定な制御を行うためには、制御ゲインを小さく設定して制御効果を犠牲にしなければならない場合もあります。高周波数成分の信号を低減するためにローパスフィルタを使用することがよくありますが、アクティブ制御用パンタグラフでは、制御したい周波数とカットしたい周波数成分が比較的近いため、有効なローパスフィルタの設計が非常に困難です。

インピーダンス制御

インピーダンス制御とは、制御したい対象が外部環境と

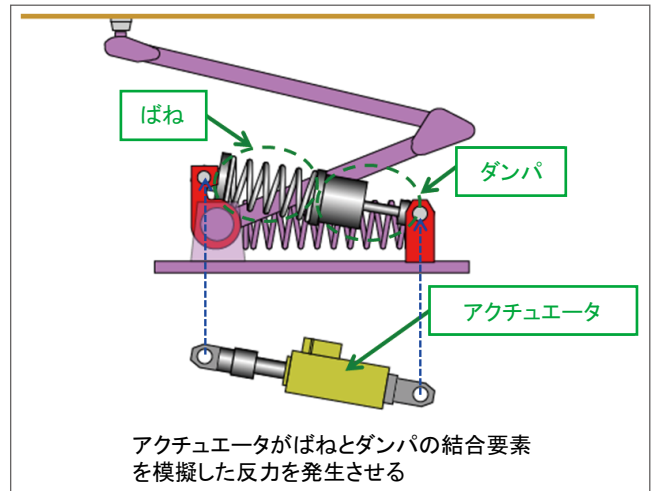


図2 パンタグラフへのインピーダンス制御適用イメージ

機械的接触状態にあるとき、外部環境と制御対象との間の機械インピーダンスを所望の値にするように制御力を与える方法です。パンタグラフへの適用例でいえば、制御対象がパンタグラフで外部環境が架線ということになります。また、外部環境と制御対象との間の機械インピーダンスとは、外部環境と制御対象の動きにくさを評価する指標といえます。架線・パンタグラフ系でいえば、パンタグラフの架線への追従しにくさを表す尺度として考えることができます。本手法では、架線・パンタグラフ間の機械インピーダンスを小さくするように制御しますが、アクチュエータはパンタグラフにしか装備されていませんので、実際にはパンタグラフの機械インピーダンスを小さくするように制御することになります。

パンタグラフの機械インピーダンスは、主に構成部材の質量と構成部材を支持する剛性によって決定されます。機械インピーダンスを変化させるためには、構成部材の質量を変化させる、あるいは構成部材を支持する剛性を変化させる必要があります。パンタグラフの接触力制御のためのインピーダンス制御では、パンタグラフが所望の機械インピーダンスを持つように、アクチュエータは仮想的なばねや減衰 (ダンパ) などといった機械要素を模擬した反力を発生させるように制御力をパンタグラフに与えます。これによって、パンタグラフは、アクチュエータの位置にあたかも所望とするばねやダンパが設置されているかのような挙動を示します (図2)。

架線からパンタグラフへの主要な外乱周波数において、機械インピーダンスが大きい値を示している場合、架線・パンタグラフ間の接触力変動が大きくなります。このような場合にアクチュエータによって、この周波数における機

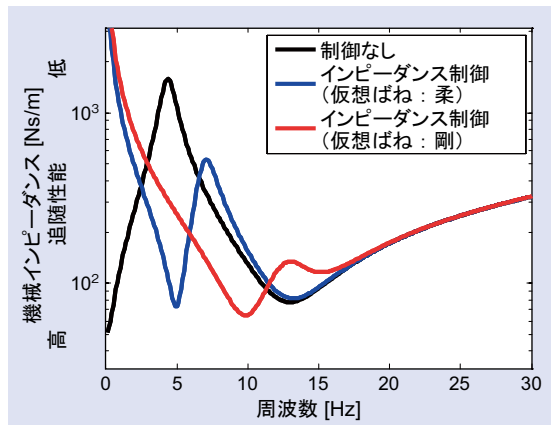


図3 インピーダンス制御によるパンタグラフの機械インピーダンスの変化例

械インピーダンスを小さくするような仮想的なばね・ダンパ要素を導入すれば、接触力変動を小さくすることができます。

インピーダンス制御によるパンタグラフの機械インピーダンスの変化例を図3に示します。インピーダンス制御によって、パンタグラフの追従性能が良くなる周波数を5Hzおよび10Hzとなるように仮想的なばねの硬さを調節しました。この例では、仮想的なダンパの特性は両方の場合について同じとしました。インピーダンス制御が無い場合、パンタグラフは約5Hzの外乱周波数を受ける場合に追従性能が悪くなりますが、青線で示したように仮想的なばねを調節することによって、この周波数に対する追従性能を向上させることができます。

本稿で紹介するインピーダンス制御手法では、制御器がアクチュエータへ指令を出すために必要な情報は、仮想的なばねとダンパの伸び縮みを算出するためのパンタグラフ枠組の変位量です。このため、パンタグラフに変位を測定するためのセンサが必要となりますが、レーザ変位計などの非接触センサを使用可能であるため制御系の構築が容易であると考えられます。また、変位計は加速度計のように高周波数成分の信号に敏感ではないことからPID制御よりも安定な制御が可能であると考えられます。

制御試験

PID制御およびインピーダンス制御による接触力変動低減効果を確認するために、パンタグラフの加振試験を実施しました。加振機によってパンタグラフの舟体部分に上下変位を与え、制御あり・なしの違いによる接触力変動の変化を調査しました。加振機によるパンタグラフ舟体への強制変位は振幅2.0mmと固定し、種々の周波数に対する制御効果を調査しました。PID制御による接触力変動P-P値

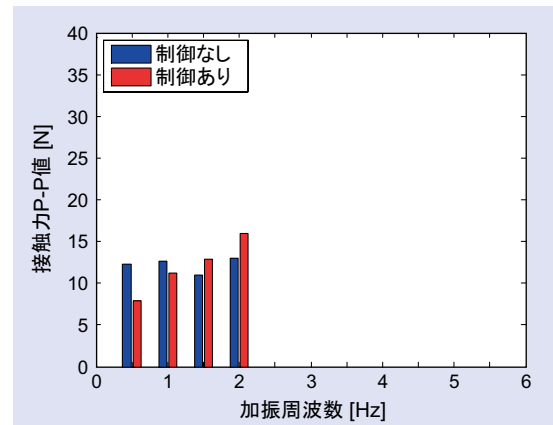


図4 PID制御による接触力変動P-P値変化

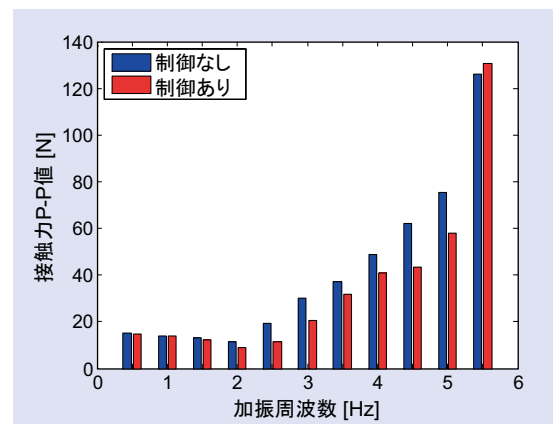


図5 インピーダンス制御による接触力変動P-P値変化

(最大値と最小値の差)の変化を図4に、インピーダンス制御による接触力変動P-P値の変化を図5に示します。ただし、PID制御は比例要素のみを使用し、制御力の大きさを決める比例ゲインは0.5で一定としています(積分ゲインおよび微分ゲインは零)。

PID制御の場合、加振周波数(パンタグラフへの外乱周波数)1.0Hzまでは制御によって接触力変動を低減することができますが、1.5Hz以上では制御を行うことによってかえって接触力の変動が増加しています。図6(a)に0.5Hzの舟体加振波形およびこれに対する接触力波形の変化を示しています。制御器に直接入力される接触力波形に、加振周波数以上の高周波数成分の信号が重畳していることがわかります。この高周波数成分の信号は、センサに混入するノイズ成分や舟体内部構造の摩擦などによって発生するびり振動に起因するものと考えられます。一方、制御を行うことによって接触力変動が増大した2.0Hzの接触力波形を見ると(図6(b)),加振周波数以上の高周波数成分の振幅が大きくなったために、制御なしの場合よりも接触力のP-P値が増大しています。このPID制御では、接触力を直接制御器に入力しているため、接触力信号が乱れる

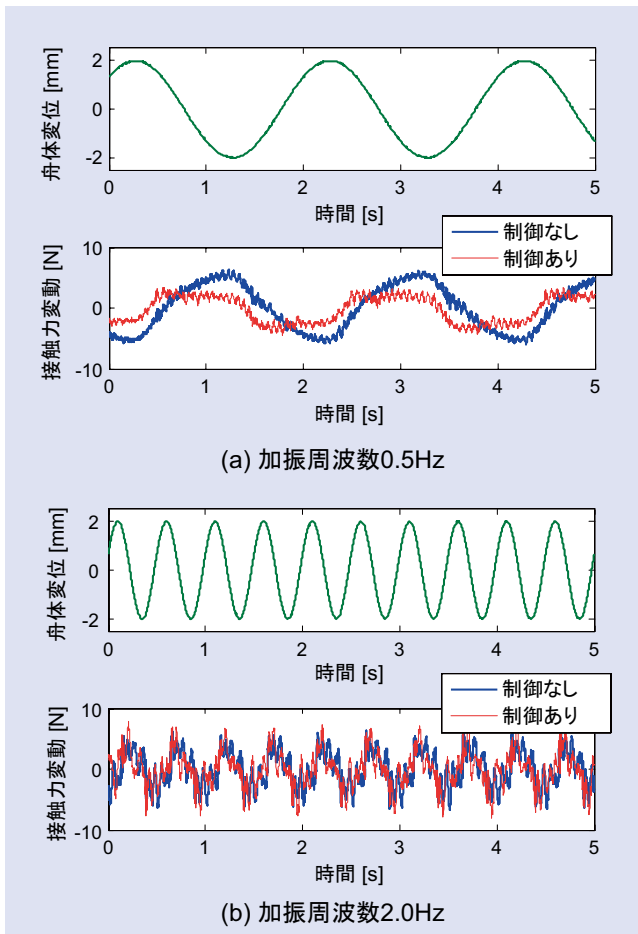


図6 PID制御による接触力の変化

とパンタグラフへの制御力も乱れ、接触力も乱れます。このような状況では、制御系は不安定になり、実際、本試験の場合では加振周波数を2Hzより大きくすると制御系が発散し、試験続行が不可能となりました。したがって、本稿で紹介するPID制御による接触力制御は、1Hz程度までの外乱周波数に対して有効であるといえます。

インピーダンス制御の場合、加振周波数1.5Hzから5.0Hzまでは、制御を行うことによって接触力変動が低減していることがわかります。5.5Hzでは、制御を行うことによってかえって接触力変動が増大していますが、PID制御の場合のように高周波数成分の信号による不安定な挙動は見られませんでした。これは、制御器に直接入力する信号がパンタグラフの枠組変位であるため、高周波数成分の信号の影響が非常に小さいためであると考えられます。図7 (a) に加振周波数5.0Hzの舟体加振波形、接触力波形を示しています。枠組変位に高周波数成分の信号が重畳していないため、5.0Hzという高い加振周波数に対しても安定に制御が可能となっています。しかしながら、加振周波数1.0Hz以下においては制御ありとなしの場合でほとんど接触力変動が変わらないことがわかります(図7 (b))。これは、イ

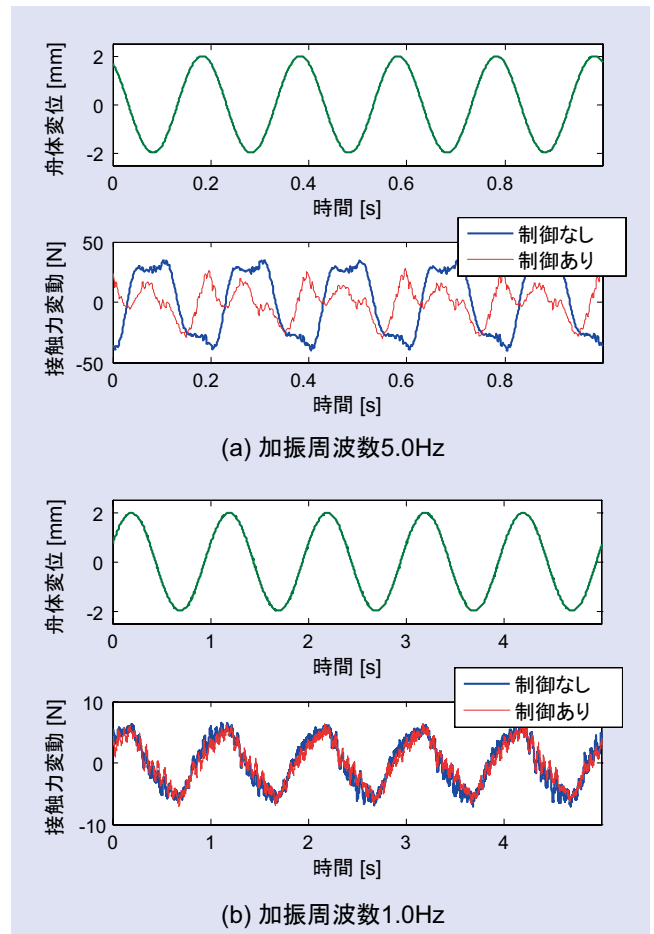


図7 インピーダンス制御による接触力の変化

ンピーダンス制御では、PID制御のように制御力の大きさを決める制御ゲイン(PID制御の場合、比例ゲイン、積分ゲインおよび微分ゲイン)が一定ではなく、制御力の大きさを決める仮想ばね定数は加振周波数が小さくなると小さくなります。加振周波数が1.0Hzを下回ると制御力が小さくなり過ぎ、制御の影響が接触力に現れなかったものと考えられます。したがって、本稿で紹介するインピーダンス制御による接触力制御は、1.5Hzから5.0Hz程度まで有効であるといえます。

おわりに

本稿では、架線・パンタグラフ間の接触力変動を低減するためのアクティブ制御手法について紹介しました。紹介した手法は、PID制御を利用する方法とインピーダンス制御を利用する方法の2種類で、それぞれ1.0Hz程度まで、および1.5Hzから5.0Hzまでの外乱周波数に対して有効であることを実験的に確認しました。今後は、両者の組合せなどにより、制御可能周波数の範囲の拡大を図る予定です。RRR