

アクティブ制御によるパンタグラフの接触力変動低減手法

鉄道力学研究部 集電力学
副主任研究員 山下 義隆

1. はじめに

鉄道車両のパンタグラフが架線と良好な機械的接触を維持するためには、両者の間に作用する接触力変動を極力小さくすることが必要である。過大な接触力は架線の許容押上量超過や架線およびパンタグラフすり板の機械的摩耗の促進に繋がる可能性があり、接触力が零になるとパンタグラフは架線への追従が不可能となり離線を起こし、アークの発生により架線およびパンタグラフの損傷を引き起こす可能性があるからである。本発表では、架線・パンタグラフ間の接触力変動低減手法として、パンタグラフにアクティブ制御技術を適用する手法を提案するとともに、その有効性を定置試験によって検証した結果を報告する。

2. アクティブ制御によるパンタグラフの接触力変動低減手法

2.1. アクティブ制御パンタグラフ

パンタグラフにアクティブ制御技術を適用するために、図1のようにパンタグラフの押上機構と並列にアクチュエータとして空気圧シリンダを導入した。舟体と上枠との間には、ばね要素が設けられており、架線への追従性を向上させている。舟体に作用する接触力の制御を行うため、アクチュエータによる制御力は直接舟体に作用する方が効率的であるが、舟体付近におけるスペースの制約や舟体重量増加が追従性を悪化させることから、アクチュエータは上記のように配置した。本発表では、図1のパンタグラフに対して、PID制御およびインピーダンス制御の2種類の制御則を適用し、それぞれの接触力変動低減手法の効果を検証した結果を紹介する。

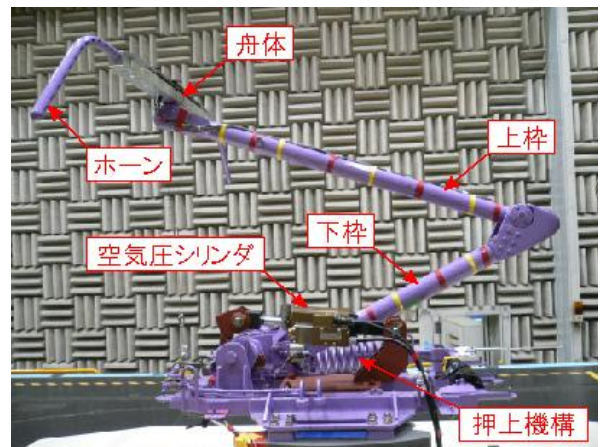


図1 アクティブ制御パンタグラフ

2.2. PID制御による接触力制御

図1に示すアクティブ制御パンタグラフの舟体内部には、加速度計およびひずみゲージが複数取り付けられており、これらの出力の重み付け加算によって接触力を測定することが可能である。このようにして測定された接触力 f_c をフィードバックし、目標接触力（本研究では静押上力 P_0 ）との偏差 e をPID制御器に入力する。偏差に応じてアクチュエータである空気圧シリンダへ指令電流が入力され、制御力が発生する（図2）。制御力は、

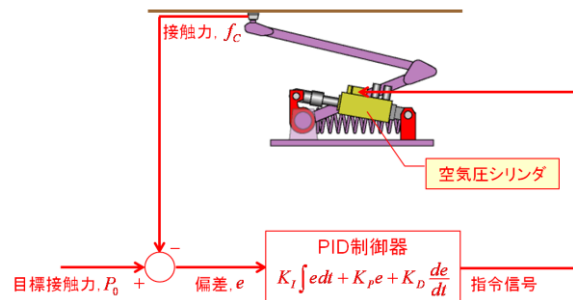


図2 PID制御概略図

$$f_A = K_I \int edt + K_P e + K_D \frac{de}{dt} \quad (2.1)$$

$$e = P_0 - f_c \quad (2.2)$$

で表される。ここで、 K_p 、 K_I および K_D はそれぞれ、比例ゲイン、積分ゲインおよび微分ゲインである。

2.3. インピーダンス制御による接触力制御

インピーダンス制御は、制御対象が外部環境との機械的な相互作用を受けるような場合に、所望の機械インピーダンスを制御対象と外部環境との間に持たせるように制御力を与えるような制御方法である。架線・パンタグラフ系の場合、追従性能を高めるためにはパンタグラフの機械インピーダンスを小さくすることが有効であることが知られている。機械インピーダンスは、変位に対する力の伝達関数であり、パンタグラフ舟体の変位入力が同じ場合、パンタグラフの機械インピーダンスが小さいほど接触力変動が小さくなる。インピーダンス制御を適用した接触力制御では、パンタグラフの機械インピーダンスを舟体変位変動の卓越周波数において極小とするように制御するものである。本制御手法では、アクチュエータは Maxwell 型の減衰要素を模擬する。アクチュエータを搭載したパンタグラフの運動モデルを図 3 に示す。図 3 中の赤点線内の Maxwell 型の減衰要素であり、アクチュエータが Maxwell 型の減衰要素が存在する場合に対応する反力 f_A を発生させる。このとき、対応する運動方程式は、次のようになる。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 (x_1 - x_2) = -f_c \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 (x_2 - x_1) + k_v (x_2 - x_v) = P_0 \\ c_v \dot{x}_v + k_v (x_v - x_2) = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

ここで、 k_v は仮想的なばね要素の剛性であり、パンタグラフの機械インピーダンスの極小値を示す周波数が舟体変位変動の卓越周波数に一致するように調節するパラメータである。 c_v は仮想的な減衰要素の減衰定数で、低周波数域の機械インピーダンスの増加を抑制するために適度な大きさの値を与えることが必要である。 k_v および c_v の機械インピーダンスへの影響を図 4 に示す。

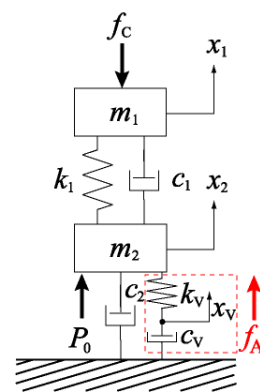
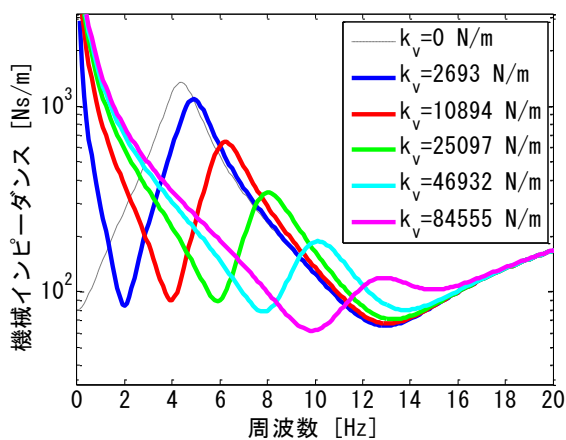
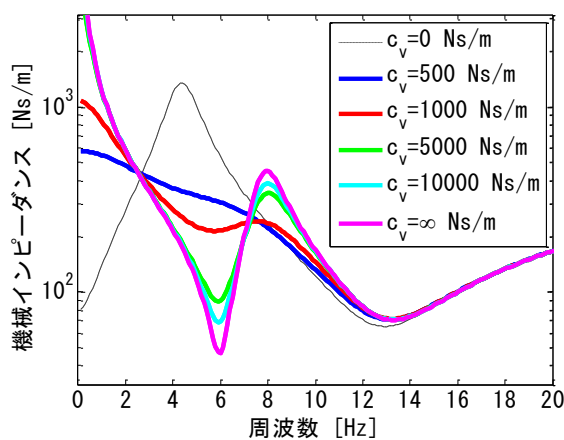


図 3 インピーダンス制御を実装したパンタグラフの運動モデル



(a) k_v の影響



(b) c_v の影響

図 4 仮想パラメータの機械インピーダンスへの影響

したがって、所望の周波数に機械インピーダンスの極小値を持たせるようなアクチュエータの制御力は、

$$f_A = k_V (x_V - x_2) \quad (2.4)$$

となる。ここで、仮想的な点の変位 x_V は、制御器によって

$$\dot{x}_V = -\frac{k_V}{c_V} (x_V - x_2) \quad (2.5)$$

で計算される。式(2.4)および式(2.5)より、制御に必要なフィードバック信号は、杵組変位に対応する x_2 のみであり、PID 制御におけるフィードバック信号である接触力と比較すると、高周波数成分の信号増幅率が小さいため、安定した制御が可能と考えられる。図 5 にインピーダンス制御の概略図を示す。

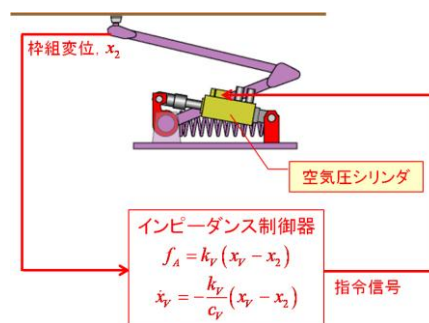


図 5 インピーダンス制御概略図

3. 加振試験

3.1. 概要

アクティブ制御によるパンタグラフの接触力変動低減効果を確認するために、舟体を加振機で上下方向に加振した場合の加振機と舟体間の接触力応答を制御あり・なしの場合について比較調査する。加振機と舟体との間には接触力を測定するためのロードセルが取り付けられている。加振機は正弦波状の上下運動をするものとする。つまり、この試験では、パンタグラフは正弦波状の凹凸を持つ剛体電車線を走行している状態を模擬していることになる。

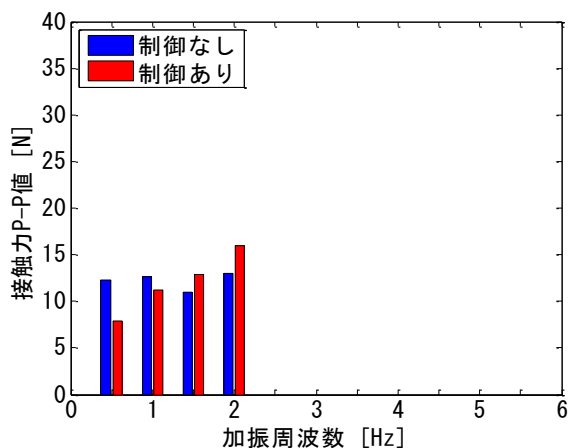
3.2. PID 制御

PID 制御の有無による接触力応答の P-P 値の比較図を図 6(a)に、接触力応答の時系列波形の一例を図 6(b)に示す。制御ゲインは比例ゲイン K_p のみ 0.05 とし、他は零とした。図 6(a)より、舟体加振周波数 0.5Hz では制御効果が確認できるのに対し、1.0Hz では制御効果はほとんど確認できない。1.5Hz や 2.0Hz に対しては、制御を行うことによって接触力変動が増大していることが分かる。また、加振周波数をさらに増大させると、制御系が不安定になり制御不能に陥った。これは、フィードバック信号である接触力の高周波数成分が加振周波数の増大に伴って大きくなるためであると考えられる。このような周波数成分を除去するためにローパスフィルタを設置するなどの対策を講じても、アクチュエータの遅れの増大をまねくことから、制御性能の向上を図ることができないことがわかっている。

3.3. インピーダンス制御

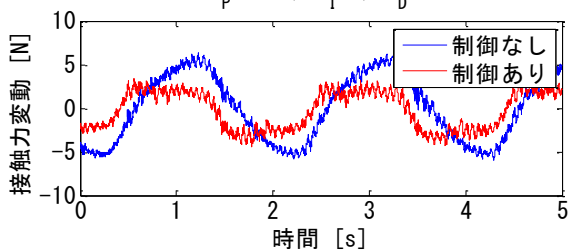
インピーダンス制御の有無による接触力応答の P-P 値の比較図を図 7(a)に、接触力応答の時系列波形の一例を図 7(b)に示す。この試験では、インピーダンス制御により機械インピーダンスの極小周波数が舟体加振周波数付近に現れるように k_V を調節した。PID 制御では制御効果がなかった、あるいは制御不能であった加振周波数 2.0Hz から 5.0Hz に対して制御効果が確認できる。これは、杵組変位は接触力と比較すると高周波数成分のパワーが小さいため、より高い加振周波数に対しても安定に制御することができたものと考えられる。ただし、5.5Hz では、制御効果がなく接触力変動が悪化しており、5.0Hz 程度が制御可能周波数の上限であることがわかる。また、

舟体加振周波数 0.5Hz、1.0Hz および 1.5Hz にみられるように、PID 制御で制御効果が確認された低い加振周波数に対する制御効果が十分ではない。この制御手法では、 k_v が小さい場合は制御力が小さく、制御力に対するアクチュエータのロードに作用する摩擦力の影響が大きくなってしまふ。低い周波数に機械インピーダンスの極小周波数を一致させるためには、 k_v の値を小さくしなければならず、摩擦力の影響で指令通りの制御力をパンタグラフに作用させられなかったために制御効果が十分ではなかったと考えられる。



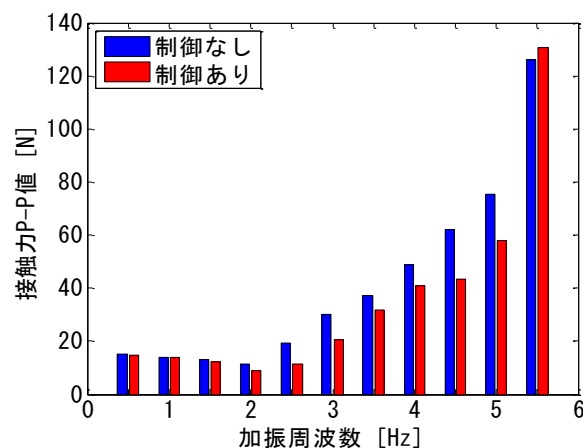
(a) 制御の有無による接触力 P-P 値の比較

$K_p=0.05, K_I=0, K_D=0$



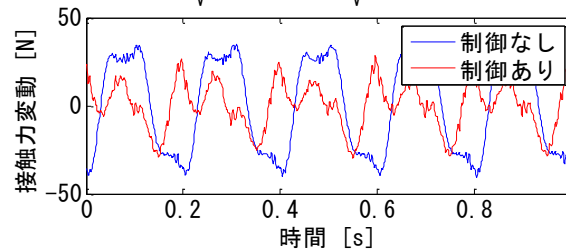
(b) 時系列波形例 (加振周波数 0.5Hz)

図 6 PID 制御による接触力変動低減効果



(a) 制御の有無による接触力 P-P 値の比較

$k_v=19384\text{N/m}, c_v=2400\text{Ns/m}$



(b) 時系列波形例 (加振周波数 5.0Hz)

図 7 インピーダンス制御による
接触力変動低減効果

4. まとめ

本発表では、架線・パンタグラフ間の接触力変動低減手法として、PID 制御およびインピーダンス制御という 2 種類の制御則を適用したパンタグラフのアクティブ制御手法を提案し、その有効性を調査する定置試験結果を示した。

接触力をフィードバックする PID 制御を適用した手法では、0.5Hz 程度の低い周波数による舟体加振に対して接触力変動低減効果があった。一方、パンタグラフ枠組変位をフィードバックするインピーダンス制御を適用した手法では、PID 制御では制御効果が得られなかった、あるいは制御不能であった 2.0Hz から 5.0Hz 程度までの舟体加振周波数に対しても接触力変動低減効果があることが分かった。この制御効果の差は、制御器へのフィードバック信号の高周波数成分のパワーが関係しており、高周波数成分のパワーが大きい接触力よりも、高周波数成分のパワーが小さい枠組変位をフィードバックする方がより安定に制御可能であることによるものである。

今後は、ランダムな舟体加振変位を与えた場合の制御効果の調査を行い、より実用的な制御手法を提案する予定である。