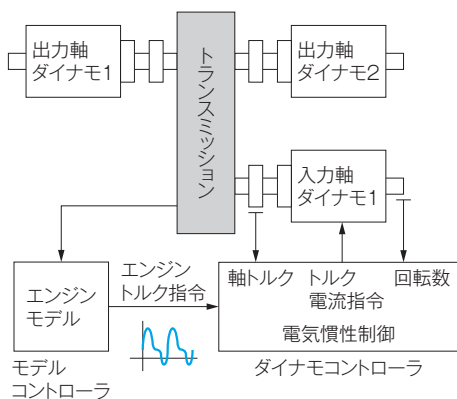


ドライブトレインベンチ入力軸のHILS (Hardware In the Loop Simulation) 対応電気慣性制御

山口 崇 Takashi Yamaguchi

キーワード 電気慣性制御, モデルベース開発, HILS

概要



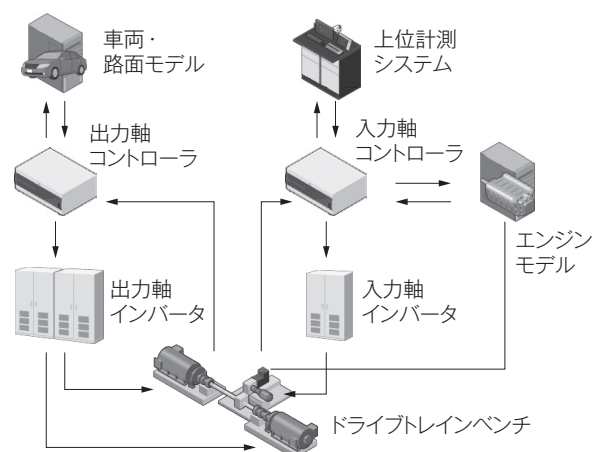
ドライブトレインベンチのHILS対応電気慣性制御

トランスミッションなどのパワートレイン機器を試験対象としたドライブトレインベンチ設備における入力軸電気慣性制御のHILS (Hardware In the Loop Simulation) 対応制御方式を開発した。近年では高精度モデルと連携したシステムの発展で、ダイナモメータに求められる応答性能が高まっている。今回開発した制御方式では、共振抑制制御と電気慣性制御を両立したコントローラをロバスト制御系の設計法である μ 設計法を適用して設計している。これにより、HILS化したダイナモベンチで、エンジンの挙動を爆発トルクまで高精度に再現できるようになった。

1 まえがき

自動車システムの高機能化・複雑化に伴い、開発における信頼性評価にかかるコストが著しく増大している。この問題に対応するため、モデルベース開発 (MBD) と呼ばれる手法が広まっている。シミュレーション技術を活用して、実車走行時の状態を詳細に検討することで設計精度が向上した。また、部品検証も従来の単純な耐久試験から実走行を模擬した環境下での試験となり、開発工数の削減と質の向上を実現できる。

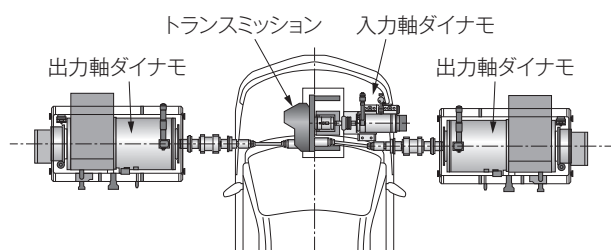
MBDのうち、部品単位の検証工程ではHILS (Hardware In the Loop Simulation) が行われる。製品周辺をシミュレーションモデルとして実車相当の負荷を与え、より実車走行に近い試験を行う。例



第1図 ドライブトレインベンチのHILSシステム構成

車両モデルとエンジンモデルを連携させたHILSシステム構成例を示す。

例えばトランスミッション試験では第1図に示すようなシステムを構築し、入力側のエンジンと出力側



第2図 ドライブトレインベンチの設備構成
トランスミッションと入力/出力軸ダイナモの接続を示す。

の車体・路面をモデル再現する。近年では、モデルが非常に高度化し、実環境の再現性能が飛躍的に向上していることから、モデル挙動の忠実な再現がダイナモメータシステム（以下、ダイナモ）に求められている⁽¹⁾。本稿では、当社のHILS対応高応答電気慣性制御を紹介する。

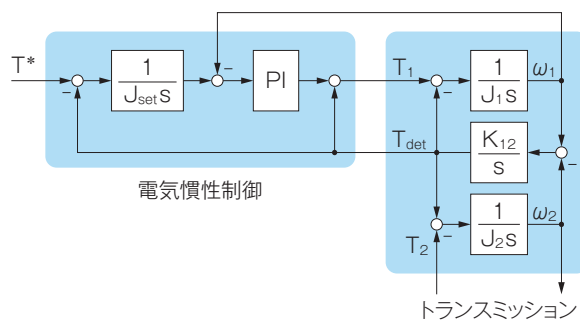
2 装置構成

第2図にトランスミッションを試験対象としたドライブトレインベンチの設備構成を示す。出力軸ダイナモは車両の車軸相当部に取り付けられ、車体挙動を模擬する。入力軸ダイナモはエンジンの代わりに取り付けられる。モデルコントローラのエンジンモデルが出力するトルク指令に対し、ダイナモコントローラではダイナモを電氣的に加速・減速させて、実エンジン慣性となるように電気慣性制御を行う。

3 制御目的・課題

試験システムのHILS化によって、実車同様にトランスミッションとエンジンモデルが動的に連携し、エンジンの燃焼や失火といった詳細な動きまでリアルタイムに再現できるようになってきている。これに伴い、ダイナモコントローラに要求される慣性応答性能も高くなってきている。

第3図に従来形の電気慣性制御方式⁽²⁾を示す。エンジントルク指令 T^* と軸トルク T_{det} に対し設定慣



第3図 従来形電気慣性制御方式⁽²⁾
速度制御を基本とした電気慣性制御方式を示す。

性 J_{set} からトルク相当の速度指令を生成し、速度制御を行う。回転数の応答特性は、トルクメータやダイナモによる数100Hzの機械共振点よりも低域にゲインが減衰する反共振点が存在するため、回転数制御の応答を機械共振点程度まで高めることは困難である。また、共振点と爆発トルク周波数が一致した場合には過大なトルクが発生し、設備破損の懸念がある。このため高い慣性応答と共振抑制の両立が求められる。ダイナモトルク指令 T_1 に対するダイナモ周りの運動方程式は、以下のとおりである。

$$\omega_1 = \frac{1}{J_1 s} (T_1 - T_{det}) \dots\dots\dots(1)$$

エンジントルク指令 T^* に対してダイナモ慣性 J_1 を設定慣性 J_{set} に模擬するには、

$$\omega_1 = \frac{1}{J_{set} s} (T^* - T_{det}) \dots\dots\dots(2)$$

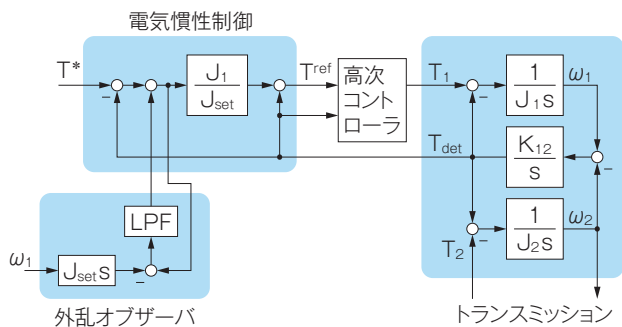
となる必要があるためコントローラ側で、

$$T_1 = \frac{J_1}{J_{set}} (T^* - T_{det}) + T_{det} \dots\dots\dots(3)$$

とすれば良い。従来形に比べ高応答化が見込めるが、軸トルクの計測むだ時間やインバータ制御応答、外乱の影響などによって制御が不安定化するおそれが高い。そのため、さらに共振を抑制するいずれかの制御と性能干渉なく連携する必要がある。

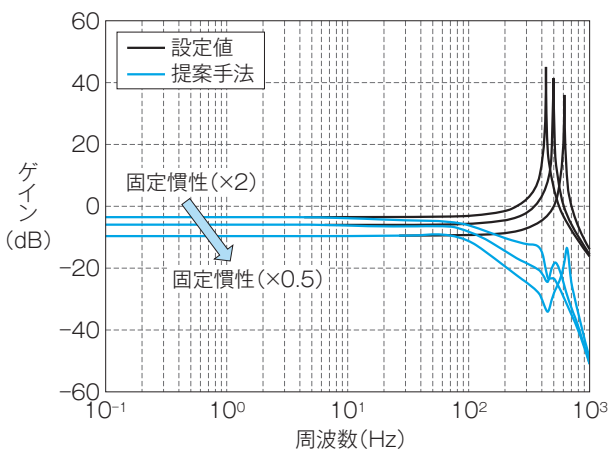
第4図に新たに提案する電気慣性制御方式を示す。

数式(1)~(3)を踏襲しつつ、まずエンジントルク指令 T^* を達成するため、 $(T^* - T_{det})$ とフィードバックしたダイナモ速度 ω_1 によって要求された慣性応答となるように、外乱オブザーバを構築して外乱補



第4図 新規開発電気慣性制御方式

軸トルクフィードバックを基本とした高応答電気慣性制御方式を示す。



第5図 エンジントルク指令に対する軸トルク周波数応答

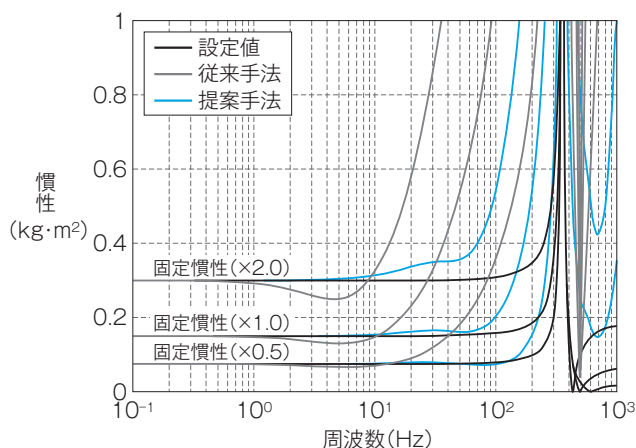
トルク指令から軸トルクまでの閉ループ周波数応答を示す。

償を行う。オブザーバゲインは慣性制御応答として50～100Hzに設定する。次に各所のむだ時間や制御応答遅れを補償しながら共振抑制と電気慣性を両立する高次コントローラを $T_{ref} - T_1$ 間に T_{det} もフィードバックしつつ挿入する。高次コントローラのパラメータ設計は、ロバスト制御の μ 設計法で決定する。 μ 設計法を適用することで、共振点の変化時や設定慣性の変化に対しても制御を安定に保つことができる。

4 シミュレーション結果

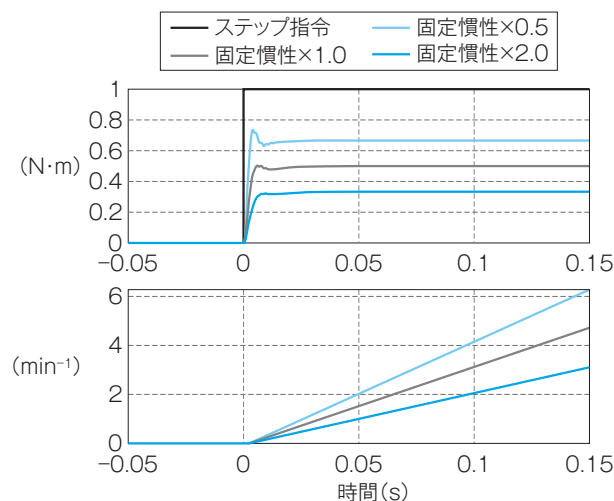
本手法のシミュレーション結果を示す。いずれも設定慣性をダイナモ固定慣性の $\times 0.5$, $\times 1.0$, $\times 2.0$ とした結果である。

第5図にエンジントルク指令に対する軸トルク



第6図 エンジントルク指令に対する慣性周波数応答

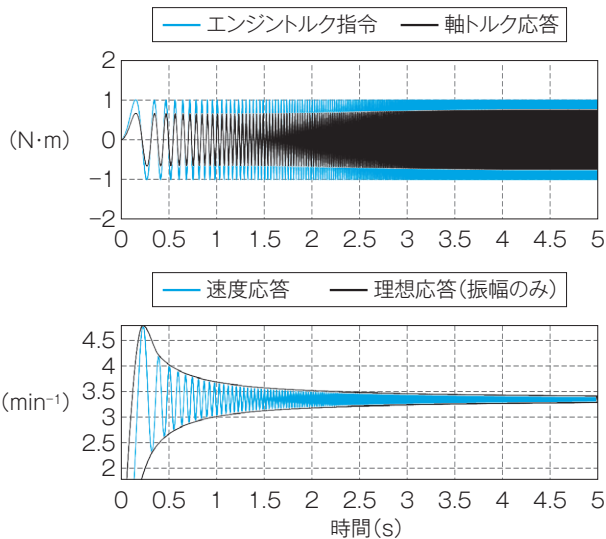
トルク指令から慣性までの閉ループ周波数応答を示す。



第7図 トルクステップ応答

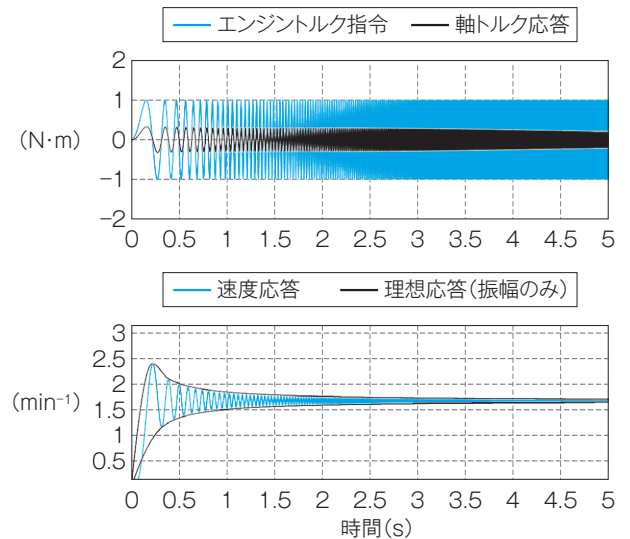
トルク指令をステップ変化させたときの軸トルクと速度応答を示す。

の周波数応答を、第6図にエンジントルク指令に対するダイナモの慣性周波数応答を示す。設定値及び従来手法による値と比較すると、軸トルクの共振を抑制しつつ、慣性を模擬できていることが分かる。従来手法では周波数上昇に従い慣性が高くなるが、提案手法では高周波まで設定値により近い慣性を示している。第7図にトルクステップ応答を示す。上段が軸トルク、下段が回転数である。ステップ指令に対して大きなオーバーシュートなく、速度も固定慣性に従って傾きの異なる一定の上昇を見せている。第8図、第9図、第10図に加振時の速度振幅を示す。0→100Hzにスイープしたときの応答で



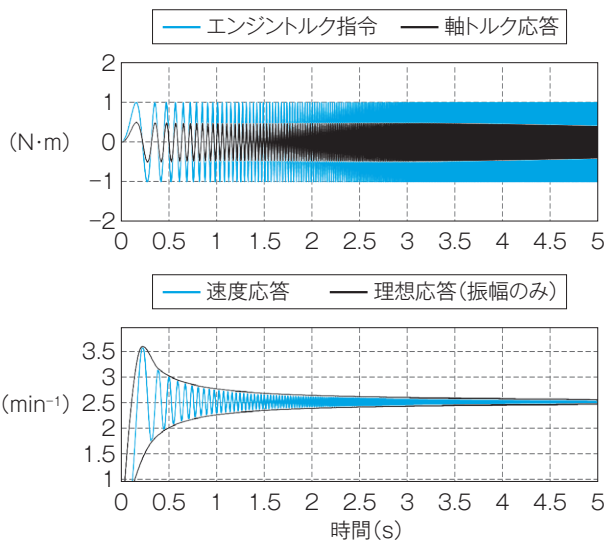
第 8 図 加振時の速度振幅 1

トルク指令に加振指令を重畳したときのダイナモ速度応答を示す。設定慣性を $\times 0.5$ に設定し、加振指令を $0 \rightarrow 100\text{Hz}$ にスイープしている。



第 10 図 加振時の速度振幅 3

トルク指令に加振指令を重畳したときのダイナモ速度応答を示す。設定慣性を $\times 2.0$ に設定し、加振指令を $0 \rightarrow 100\text{Hz}$ にスイープしている。



第 9 図 加振時の速度振幅 2

トルク指令に加振指令を重畳したときのダイナモ速度応答を示す。設定慣性を $\times 1.0$ に設定し、加振指令を $0 \rightarrow 100\text{Hz}$ にスイープしている。

上段が軸トルク、下段が回転数である。回転数はいずれもダイナモ慣性が設定慣性となった理想状態と比較する。エンジン爆発トルク相当の加振に対し、軸トルクの振幅に大きな変動はなく、速度変動は設定慣性に従って理想的な動作と同等の振幅挙動を示している。

5 むすび

新たにドライブトレインベンチ入力軸向けの HILS に対応した電気慣性制御を開発した。この制御方式によって高精度エンジンモデルとの連携性能が向上し、従来よりもエンジンの再現性が高まり、台上試験性能が向上した。

今後も優れた HILS 試験システムを提供していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 秋山岳夫・小川一博・澤田喜正・山本透：「ドライブトレインベンチの軸トルク加振制御」, 電学論 C Vol.134 No.7 p.909-916, 2014
- (2) 秋山岳夫・澤田喜正・山本透：「ドライブトレインベンチの低慣性化制御技術と実路走行負荷模擬制御への応用」, 電学論 C Vol.135 No.8, p.992-999, 2015

《執筆者紹介》



山口 崇
Takashi Yamaguchi
動力計測システム工場
動力計測用製品の制御装置の開発に従事