

地球環境に貢献する 日立グループの電動化ソリューション

Hitachi's Solution on Electric Motorization Contributing to Environment

宮崎 英樹

Miyazaki Hideki

大山 和人

Oyama Kazuto

岩路 善尚

Iwaji Yoshitaka

山崎 勝

Yamasaki Masaru

自動車やサーボ工作機は、従来のエンジンや油圧機構から、モータを応用した電動化システムに変革する傾向にあり、エネルギー消費の大幅な削減と、システムの高性能化が期待されている。こうした電動化は、今後の十数年で、産業・社会インフラに広く普及すると予想される。

電動化は、単にモータを動力源に使うだけでなく、システム全体でエネルギーを有効利用する工夫が必要である。日立グループは、電動化の普及に貢献するために、モータやバッテリーなどのキーコンポーネントとシステムに調和した新しい制御技術によって、電動化に期待されるさまざまなニーズに応えるソリューションを提供していく。

1. はじめに

電動化は、エンジン・油圧で駆動する機構システムからモータ、インバータ、電池／電源を備えたモータシステムに変革することであり、省エネルギー、温暖化ガス低減などの環境対応性と、モータ駆動による機構系の高性能化が特徴である。

電動化の事例は、ハイブリッド自動車(HEV: Hybrid Electric Vehicle)がよく知られているが、このほかにもサーボ工作機(プレス機、射出成形機ほか)やハイブリッド自動車、電動建設機械など産業・社会インフラに適用され、徐々に広がる傾向を見せている。従来のモータ応用製品は定常運転での効率改善をねらいとしたが、電動化は常時変化する運転に対しても短時間に高トルクで変化する動作を行うことが特徴であり、エネルギーのサイクル的利用法から省エネルギー化を図る。具体的には、機構系が制動(ブレーキ)する際の運動エネルギーから電気エネルギーを作り出し、電池を充電する回生動作が挙げられる。

電動化システムにおいては、各コンポーネントに専用の仕様が求められる。例えば、モータでは、応用製品に専用化した仕様で設計され、体格も搭載性を考慮して限界まで

小型化する。

ここでは、今後の電動化に関して、日立グループが提案するソリューションと、これを支える新しい制御技術について述べる。

2. ハーモニアス・モータシステム

エンジン・油圧駆動から電動化に変革する過程では、従来の機械システムでは実現できなかった高機能・省エネルギー化を追求する。日立グループは、電動化にかかわるさまざまなニーズ、課題を解決するソリューションとして、「ハーモニアス・モータシステム」のコンセプトを提唱する(図1参照)。これは、電動化の基本課題を環境性と駆動性の両立に据え、電源／バッテリー、インバータ、制御、モータ、そして機構系を相互に調和させ、システム指向の解決

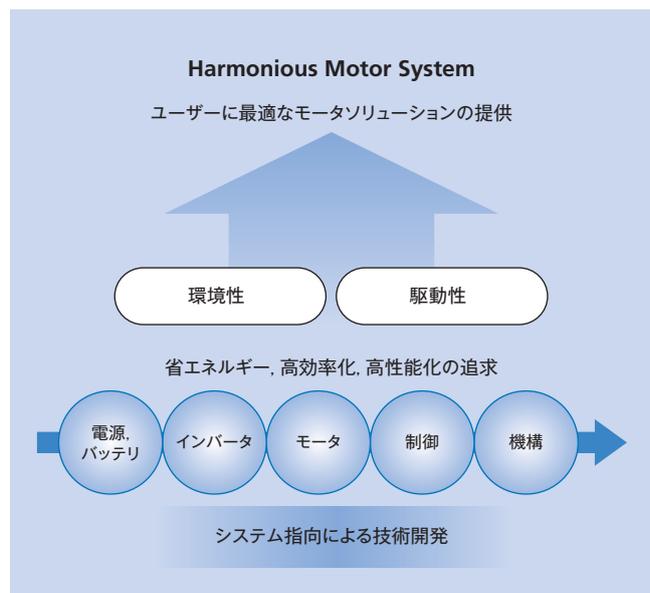


図1 「ハーモニアス・モータシステム」のコンセプト
電源／バッテリー、インバータ、制御、モータ、機構系を一貫して扱うことでさまざまなニーズに応える電動化ソリューションを提供する。

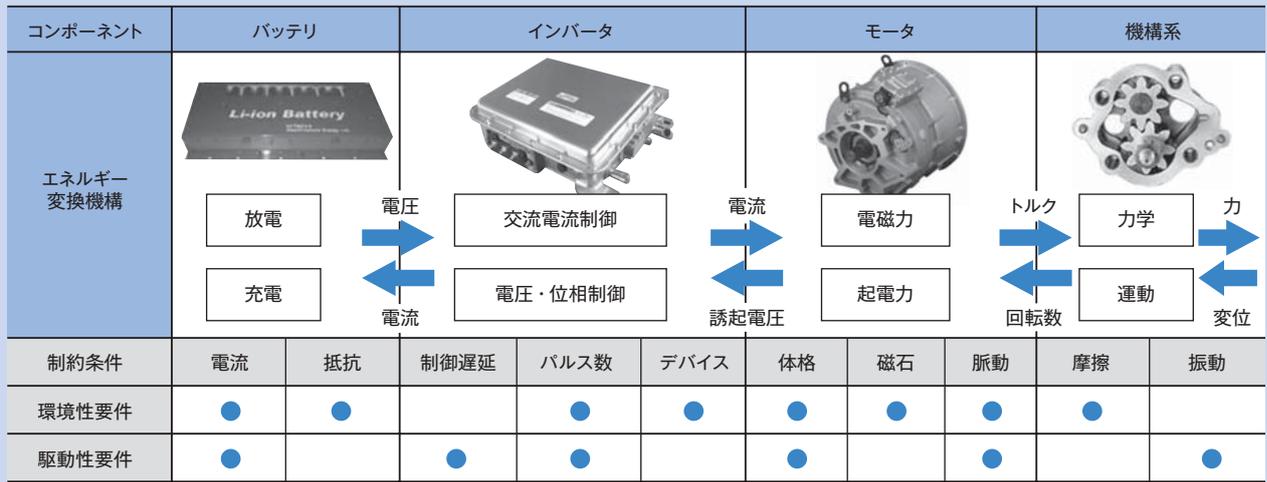


図2 | 電動化システムコンポーネントの相関関係

電動化システムに対し、バッテリー、インバータ、モータ、機構系を、それぞれのエネルギー変換機構に基づき、相関関係を考慮して調和的に制御する。

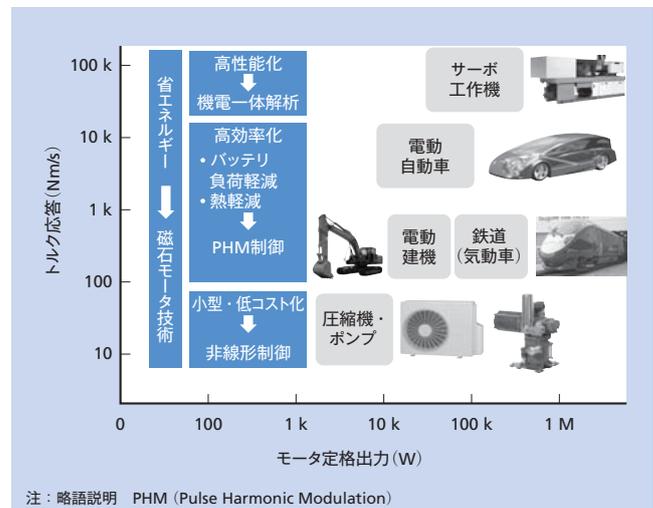
を導くことが目標である。

電動化システムに対し、コンポーネントを調和的に適合させる策は、バッテリー、インバータ、モータ、機構系について、それぞれのエネルギー変換機構に基づき、その相関関係を考えることから始める。相関関係の例を図2に示す。バッテリーは化学的な放電と充電の特性を持ち、電圧と電流をパラメータとして、次のインバータにつながる。インバータは指令に基づき、交流電流制御（周波数変換を含む。）と電圧・位相制御を行う。インバータが出力する交流電流によって、モータは電磁力を発生させてトルクを出力する。また、モータが機構系にトルクを加えて回転させた結果、回転数が決まる。モータは外力で回転されると起電力を発生し、この電圧をインバータに加える。最後にモータのトルクと回転数により、機構系は力と変位を発生させる。

各コンポーネントはエネルギー変換の機構は違っても、物理的には入力、出力がパワー（あるいは仕事量）で連続性がある。そこで、ハーモニアス・モータシステムでは、各コンポーネントの物理的な特性をモデル化し、一貫したシミュレーションで検討することにより、システムの動作を定量的に事前評価する。

各コンポーネントの主要な設計条件を制約とし、システムが求める環境性と駆動性の要件に対する寄与を同図に示した。バッテリーは電流、インバータはパルス数、モータは体格と脈動が環境性と駆動性の両方にかかわっている。これらの制約を意識して、バッテリー、インバータ、モータ、機構系に関する制御問題を解き、調和的な解決を導いていく。

適用分野を考慮した技術の推奨を図3に示す。モータ出力が比較的小さく、トルク応答も低い圧縮機やポンプに対しては、磁石モータに適した非線形制御¹⁾を開発した。ま



注：略語説明 PHM (Pulse Harmonic Modulation)

図3 | 電動化システムに対応した基盤技術

ここでは、磁石モータを用いた電動化をベースとして、制御の新技术とシステム設計に効果的な解析技術を取り上げている。

た、電動自動車や電動建機のように、バッテリーを備える移動体に対しては、高効率なPHM (Pulse Harmonic Modulation: 高調波変調省パルス駆動) 制御³⁾を開発中である。サーボ工作機のように、数万Nmものトルクを瞬時に制御する分野には機構・電気一体解析技術を構築し、システム設計や装置性能を改善する⁴⁾。これらの基盤技術を応用して、さまざまなニーズに応える最適なモータソリューションを提供していく。

3. モータの小型化と高応答性に挑戦する非線形ベクトル制御技術

3.1 顕在化するモータの非線形性

電動化を推進するうえで、重要となるポイントとしてモータの高効率化と小型化が挙げられる。このため、モータ設計は、効率とサイズに重点をおいて最適化されているとも言える。しかし、モータはシステムの一部品であるこ

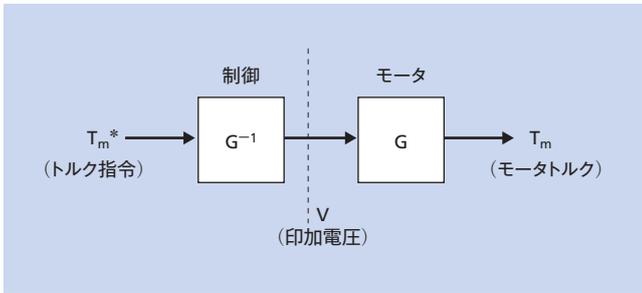


図4 | モータ特性と制御の関係
モータの伝達関数Gに対して、その逆モデルを制御で実現することで、自在にモータトルクを制御できる。

とから、システムとしてどのような動かし方をするのか、すなわち、応答性能もきわめて重要になる。この応答性能を決定づけるのが「制御技術」である。

モータの制御とは、図4に示すように、モータの電気特性(同図では伝達関数Gで表現)に対応した制御モデル(逆モデル G^{-1})を制御器内部に構築することで、自由自在なトルク応答を実現するものである。この代表的な手法が「ベクトル制御」である。

ところが、現在電動化の牽(けん)引役として期待されている永久磁石同期モータは、従来のモータに比べてその制御が難しい。その理由は、図5に示す非線形性の問題である。従来は、モータの磁気回路特性は線形と見なすことができ、制御は基本的に「線形制御理論」に基づいて設計されてきた。しかし、永久磁石を用いたモータでは、高出力密度を実現しようとするほど、この線形性から逸脱し、磁気飽和や他軸との干渉といった非線形性が顕在化してくる。この結果、応答性能そのものの劣化や、所望の応答を得るための調整作業に多大の時間を費やすようになっ

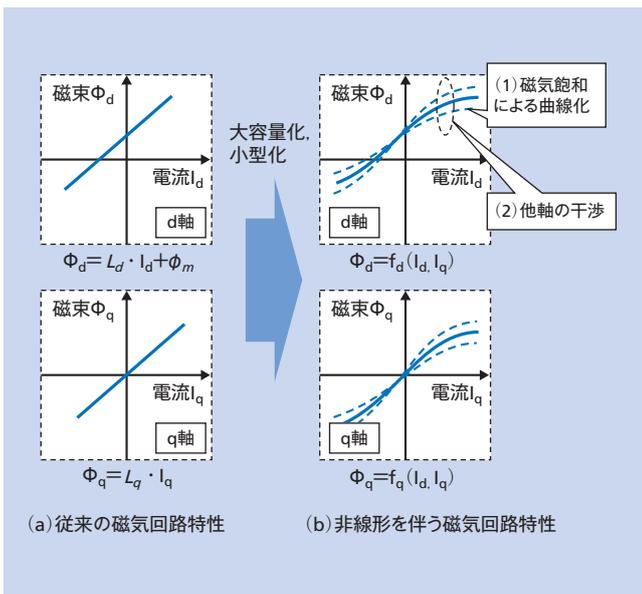


図5 | モータ内部磁束の磁気回路非線形性
電流と磁束の関係が直線(線形)でなく、曲線(非線形性)化し、同時にdq軸間の干渉が発生する。

| モータ特性 | 従来(線形)制御 | 非線形ベクトル制御 |
|------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| (1) 線形 ○モータ | ○モータ特性に対応 線形逆モデル | ○制御 非線形逆モデル(線形域を包含) |
| (2) 弱非線形 □モータ | △モータ特性との誤差発生 定数変動と見なす ↓ 応答劣化 | □制御 非線形逆モデル ↓ 応答劣化せず |
| (3) 強非線形 ◇モータ | ×モータ特性との差異大 制御不可 ↓ モータ再設計 | ◇制御 非線形逆モデル ↓ 応答劣化せず |

図6 | モータ特性に対する線形・非線形制御の概念
モータの特性に合わせた適切な制御を導入することで、応答特性を劣化させずに理想の制御を実現する。

ている。とりわけ、近年応用分野が広がっている「センサレス制御(回転子位置センサーを用いない制御)」への影響は大きく、非線形性の扱いが大きな課題となっている。

3.2 非線形ベクトル制御

現状、非線形性への対応は、線形制御の範囲内で「定数変動」として非線形性を扱うのが一般的である。場合によっては、制御性能を得るためにモータ設計を保守的に変更するなどの対策がなされている(図6参照)。

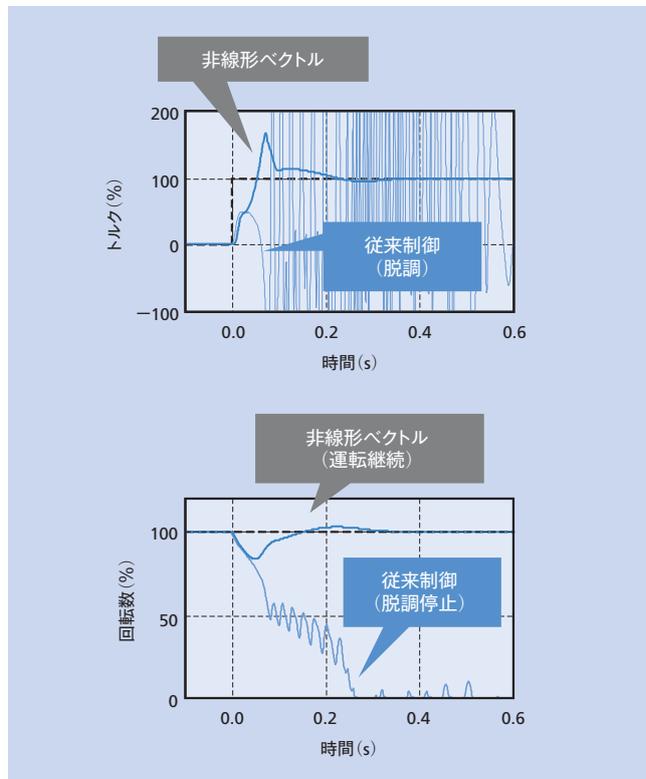


図7 | 強非線形を有するモータに対するインパクト負荷外応答比較(シミュレーション)
非線形性を制御に取り入れることで、負荷外乱に対する応答性能を向上させることができる。

これに対して、非線形性をそのまま数式化（モデル化）し¹⁾、ベクトル制御を再構築した「非線形ベクトル」を開発した²⁾。非線形ベクトルは、モータの持つ非線形性をそのまま制御モデルに取り入れることができるため、モータ設計に制御上の制約を与えることはない。つまり、モータサイズを極限まで小型化することが可能である。

極限までモータサイズを小型化したモータの負荷インパクト応答波形のシミュレーション結果を図7に示す。これらの優位性は、モータ負荷の機械特性や、負荷の状態によって大きく変わるが、従来比で約20%の小型化が可能という結果も得られている。今後、モータの非線形問題はますます顕在化すると予想されるため、非線形ベクトルの対応が必須になると考える。

4. モータ、インバータ、バッテリーを調和する統合制御技術

三者の調和を図って高効率な統合制御システム実現のため、交流モータ駆動をはじめとするアプリケーションに幅広く適用可能な新しい変調方式PHM制御³⁾を開発している。

4.1 PHM制御

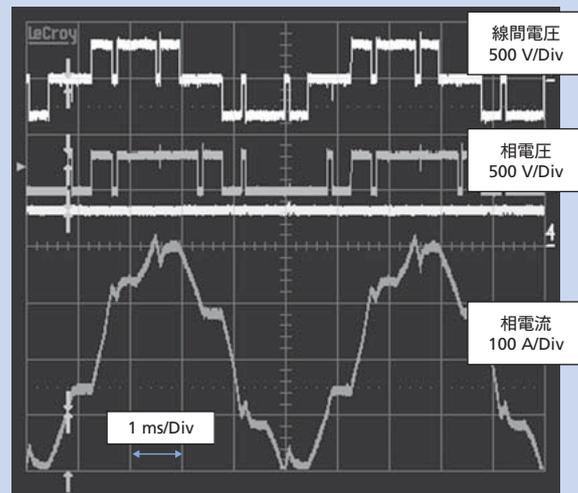
PHM制御はインバータ損失を低減する新しい変調方式である。インバータ損失はIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) に代表されるデバイスのスイッチング損失と導通損失の合計であるが、この制御で低減をねらうのはスイッチング損失であり、モータ電流ひずみを大きくすることなくスイッチング回数を低減することが目的である。

モータは誘導性負荷であり、モータ電流高調波のn次成分はインピーダンスによって $1/(n\omega L)$ に減衰していく。このため、インバータ出力電圧高調波の高次成分よりも低次成分のほうがモータ電流高調波として現れやすく、モータ電流ひずみの原因となる。したがって、インバータ出力電圧高調波には低次成分が含まれていないことが望ましい。

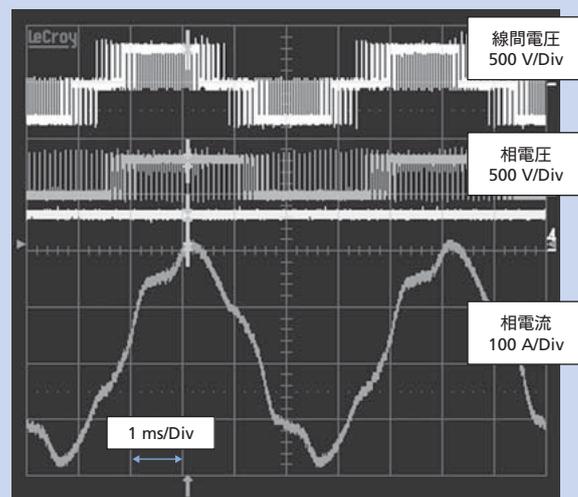
交流モータ制御で一般的な正弦波PWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) 制御ではキャリア周波数を上げ、細かくスイッチングすることでインバータ出力電圧の基本波以外の高調波成分を低減しているが、スイッチング損失は増大してしまう。

PHM制御は、モータ線間電圧パターンのスイッチング位相と高調波の関係を、フーリエ級数展開を利用して、ある特異条件下で定式化して解くことで、特定の高調波成分を削除する最少スイッチングパターンを簡単な代数計算で決定する。

PHM制御とPWM制御の比較例を図8に示す。PHM制御は正弦波PWM制御のように細かくスイッチングする必



(a) 高調波変調省パルス駆動 (PHM) 制御



(b) パルス幅変調 (PWM) 制御

注: 略語説明 PWM (Pulse Width Modulation), HEV (Hybrid Electric Vehicle)

図8 | PHM制御 (5次高調波削除) とPWM制御 (キャリア10 kHz) 電気角周波数250 Hz, 日立製HEV用試験モータにおいて比較した結果, 電気角1周期当たりのスイッチング回数はPHM制御が5回, PWM制御が50回, 電流総合ひずみ率はPHM制御が14.5%, PWM制御が11.4%である。

要はない。約1/10のスイッチング回数でインバータ出力電圧から特定の低次高調波を削除し、ほぼ同等のモータ電流を再現できている。またPHM制御で変調度を上げていくとモータ線間電圧の各パルス幅は増加し、最終的に変調度1.27で各パルス間隔はすべてゼロとなり、矩(く)形波(高調波削除なし)へとシームレスに移行する。

4.2 調和型統合制御システム

PHM制御はインバータ損失低減だけでなく、モータ、インバータ、バッテリーのシステム効率低減にも貢献する。

PHM制御では主に弱め界磁領域でPWM制御よりも高い変調度を選択できる自由度がある。そこで高い変調度を適用してモータへの出力電圧を高め、弱め界磁電流(無効電流)を減らして出力を落とさずモータ電流を減らすこと

ができる。これはモータ銅損低減とバッテリー電流低減(充電容量低下抑制)につながる。

磁気回路設計によってモータ特性は変化し、モータ動作点によって要求される電流総合ひずみ率も異なる。PHM制御はモータ電流高次高調波を、モータの誘導性負荷インピーダンスによる減衰効果に期待している。この減衰効果が十分でない場合は、5次高調波削除から5,7次高調波削除にするなど、交流モータ駆動条件に応じて削除すべき最適電圧高調波次数は適宜調整すればよい。

5. 機械系と電気系を一貫設計する統合シミュレーション技術

5.1 統合シミュレーション技術の概要と効果

モータを用いた製品の多くは、制御系・電気系・機械系が相互に影響し合って動作している。このため、モータ本体や制御ロジックを最適なものとするためには、相互作用を考慮した設計が求められ、製品システム全体での検討が必要である。これに対応するため、一貫解析が可能な統合シミュレータを開発した(図9参照)。

統合シミュレータは、制御系・電気系・機械系に対応した演算ブロックから成り、これらを主に仕事率で連結して全体の計算を連成させている。また、おのこの演算ブロックでは割り込みによる正確なタイミングの制御演算、磁界解析結果を用いたモータ特性演算、荷重や速度を加味した機械系の効率演算などを実装し、一般に非線形性を示す製品特性の高精度な予測を可能としている。

統合シミュレータの計算例を図10に示す。これは、サーボモータを用いたプレス機の成形動作を計算したものである。この図からモータ速度およびトルクが正確に計算できていることがわかる。

現在、統合シミュレータのさらなる利用として、設計変更による効果が定量的に評価できる利点を生かし、パラメータの最適化を制御系・電気系・機械系を連成させた状態で実施し、実効的な最適値を探索する計算の試行を行っている。

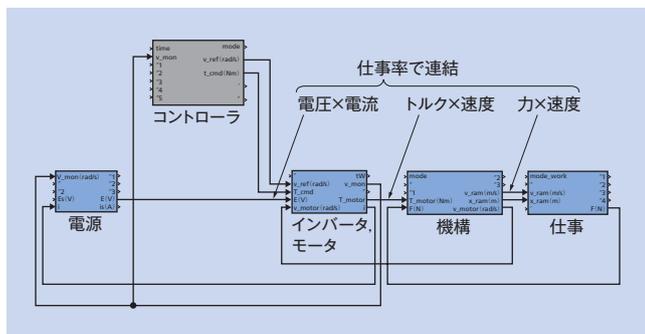


図9 | 統合シミュレータの概要

製品システム全体としての動作を検討するため、制御系・電気系・機械系それぞれの計算を仕事率や媒介変数で連結し、連成計算を行う。

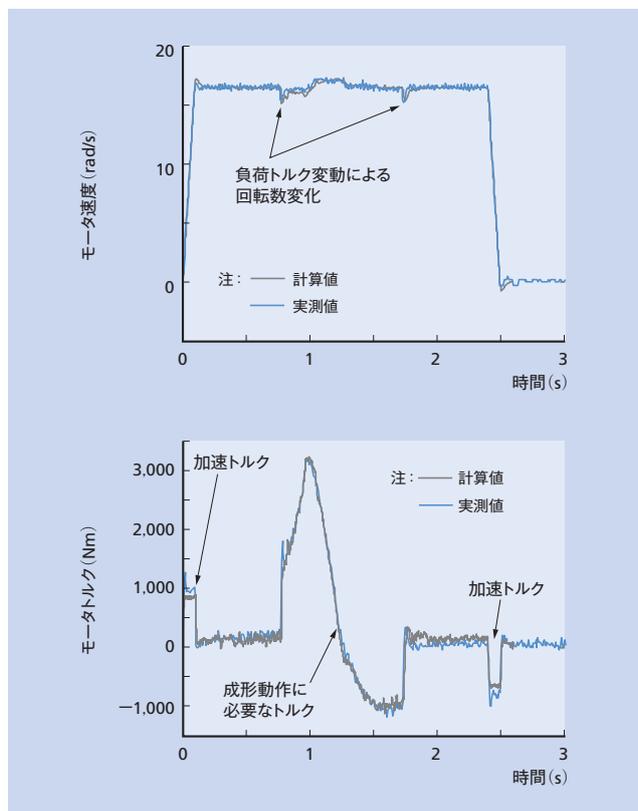


図10 | 統合シミュレータの計算例

サーボモータで駆動するプレス機の成形動作を計算して実測と比較した。機械の回転数上昇に必要な加速トルクや成形動作に必要なトルク、また、負荷トルク変動による回転数変化が正確に計算できている。この結果は、アイダエンジニアリング株式会社の協力を得て、低速・高トルクサーボモータを用いたサーボプレス機の成形動作を計算したものである。

5.2 機械特性を考慮したモータドライブ系の検討

統合シミュレータではモータにかかる機械系の負荷を正確に演算するため、特に運転の際に問題となる共振点や負荷の増大点を把握できるように、機械系のモデルを精密に構築している。

現在、このモデルをシミュレータとして活用するだけでなく、モータドライブ系の高度化へ活用することを検討している。具体的には、まずモデルを用いて機械系の好ましくない挙動を把握し、それらの原因となる入力特定する。次に、好ましくない挙動を抑制するようにモータ出力を調整するロジックを導出し、これをプログラム化してドライブ装置に搭載する手法である(図11参照)。ここで、調整プログラムはより多くの事象に対応できるようにモデルを変形して所望の評価値を算出する評価モデルとして準備し、必要に応じてモデルのパラメータを書き換えることで、迅速にさまざまな変化に追従可能な構成にできる。

さらに、評価モデルの進化形として、機械系モデルを変形して速度や荷重、また速度の2乗、荷重と速度の積といった特徴的な変数に分類してまとめるモデルの開発に着手した。このモデルは、変化量の係数の調整だけでさまざまな機械に対応できるので、「ユニバーサルモデル」と称し

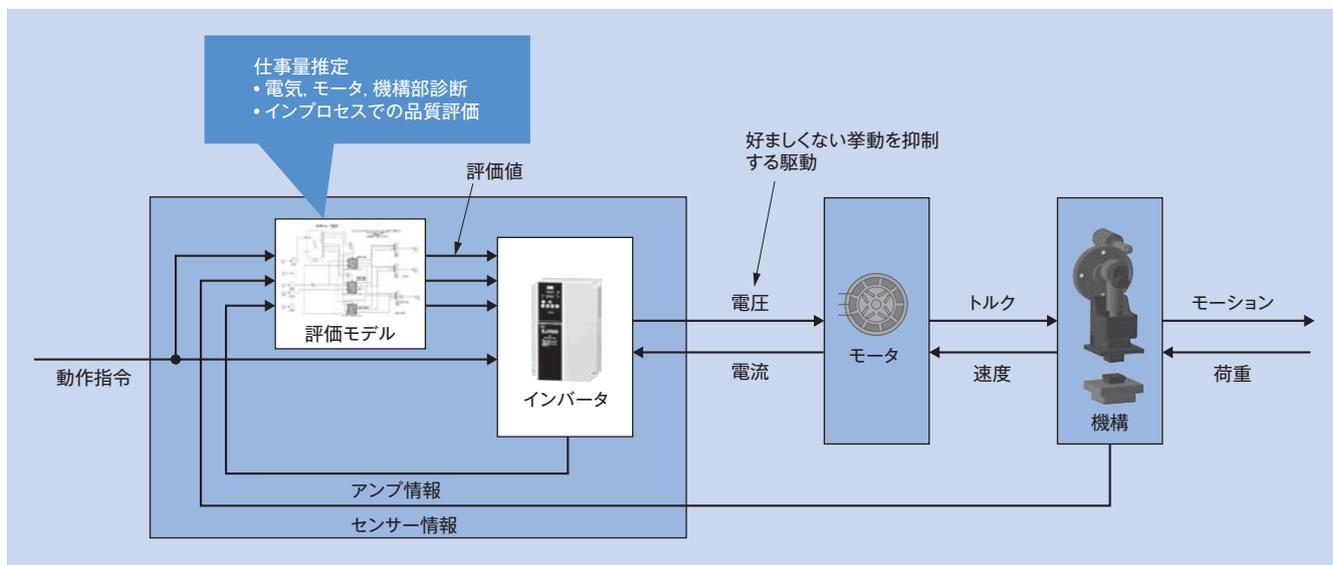


図11 機械系の評価モデルを用いた制御の高度化

評価モデルを用いてモータの仕事量や各部診断、加工の品質評価を行う。モータ駆動の際、これを利用して駆動トルクの増減、運転モードの切換などを行い、モータドライブ装置の高度化を図る。

ている。ユニバーサルモデルの特徴は、変数量ごとにまとめることにより、従来の詳細モデルに比べ、計算品質を保ちながら計算量を格段に減らせることである。よって、モデル同定や計算が高速に実行できる可能性があり、将来はモータのインバータ装置に組み込んで、機械系の実時間評価や外乱抑制機能の実時間修正を行える高付加価値のモータドライブシステムとして製品化することをめざしている。

6. おわりに

ここでは、日立グループが今後の電動化システムに向けて提唱するソリューションと、それを実現する新しい制御技術、解析技術について述べた。

今後、地球温暖化問題への対応として、省エネルギー化の義務づけが予想されるが、日立グループは電動化を通じて、省エネルギー化とシステムの付加価値を高める高機能化を同時に果たすソリューションを提供したいと考えている。

参考文献

- 1) 中津川, 外: 磁気飽和およびdq軸間干渉を考慮した永久磁石同期モータの数式モデルの提案, 平成21年電気学会産業応用部門大会, No.1-150 (2009.8)
- 2) 名倉, 外: 磁束飽和およびdq軸間干渉をモデル化した新ベクトル制御法, 平成21年電気学会産業応用部門大会, No.1-151 (2009.8)
- 3) 古川, 外: 高調波変調型省パルス駆動による高効率モータ制御, 平成22年電気学会産業応用部門大会, No.1-134 (2010.8)
- 4) 山崎, 外: スクリュー空気圧縮機の統合システムシミュレータの開発, 日本フルードパワーシステム学会論文集 (2010.5)

執筆者紹介



宮崎 英樹

1983年日立製作所入社, 電動力応用統括推進本部 統合開発センター 所属
現在, 電動化分野におけるモータシステムの開発に従事
電気学会会員



岩路 善尚

1992年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター モータシステム研究部 所属
現在, 産業, 家電, 自動車補機などのモータ制御の開発に従事
博士(工学)



大山 和人

1989年日立製作所入社, 電動力応用統括推進本部 統合開発センター 所属
現在, 電動化分野におけるPHM制御の開発に従事



山崎 勝

1991年日立製作所入社, 電動力応用統括推進本部 統合開発センター 所属
現在, 電動化分野におけるシステムシミュレータの開発に従事
日本機械学会会員