

永久磁石同期モータ制御の仮想検証システム

Virtual Verification System for Automatic Optimization of PMSM Control Parameters

鈴木 信行 齊藤 徹

■SUZUKI Nobuyuki ■SAITO Toru

地球環境保護の観点から、家電製品には省エネが求められており、インバータ駆動の永久磁石同期モータ (PMSM) を採用する製品が増加している。インバータにはマイコンが実装されており、PMSMを駆動するためのソフトウェアが組み込まれている。このソフトウェアはベクトル制御を実現するもので、PMSMの効率や応答性に影響を及ぼす制御パラメータを適正化する必要がある。

東芝は、PMSM制御の仮想検証システムを構築し、このシステムを用いてモータ駆動用ソフトウェアの制御パラメータを自動で適正化する環境を開発した。このシステムは、家電製品などのモータ駆動システムにおいてソフトウェアの品質確保及び開発効率向上に非常に効果的である。

In order to realize energy-saving home appliances from the standpoint of global environmental awareness, an increasing number of products are equipped with a permanent magnet synchronous motor (PMSM) driven by an inverter on which a microcomputer is mounted to control the PMSM. Software incorporated in the microcomputer is required to optimize the control parameters that affect the responsiveness and efficiency of the PMSM.

Toshiba has established a development environment for software to automatically optimize PMSM control parameters by constructing a virtual verification system for PMSMs. This system assures software quality and improves the efficiency of development of PMSM drive systems for home appliances.

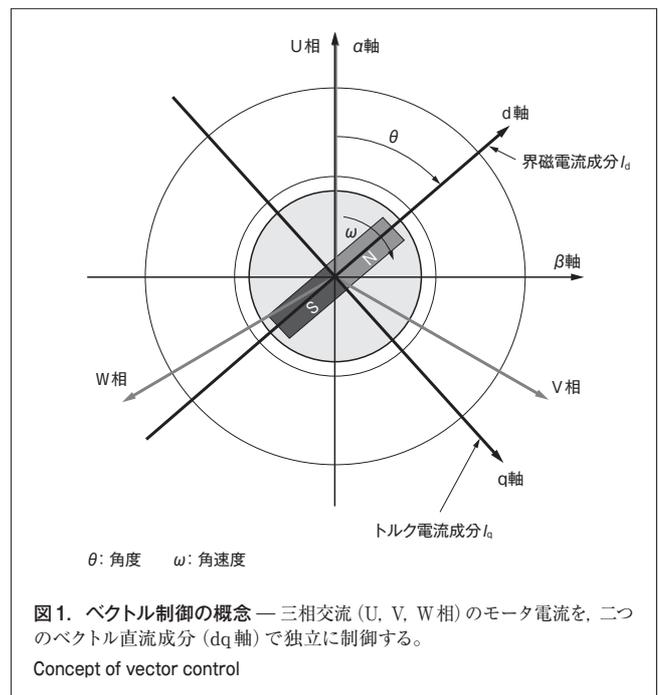
1 まえがき

近年、地球環境保護の観点から、家電製品の省エネ化が求められている。家電製品の消費電力量は、エアコンがもっとも多く、照明器具、冷蔵庫、テレビ、洗濯機がこれに続く。これらの中で、エアコン、冷蔵庫、及び洗濯機は、搭載されているモータの消費電力が多く、各メーカーはモータの省エネ化に向けて開発を進めている。

モータの種類は、当初、一定速度で駆動する誘導モータが用いられていた。1990年代に入ると、高効率化に有効な永久磁石同期モータ (PMSM)を用いてインバータ制御で駆動するようになった。

インバータの制御技術として、ベクトル制御により正弦波駆動を実現する技術が注目されている⁽¹⁾。ベクトル制御とは、**図1**に示すように、三相交流のモータ電流を、モータトルクq軸成分とモータ界磁d軸成分の二つのベクトル直流成分に分け、それぞれ独立して制御するもので、PMSMを効率よく駆動できる。

インバータにはマイコンが実装されており、モータ駆動用ソフトウェアとしてこのベクトル制御が組み込まれている⁽²⁾。このモータ駆動用ソフトウェアで有効に制御するためには、モータの効率や応答性に影響を及ぼす制御パラメータを適正化する必要がある。



東芝は、PMSM制御の仮想検証システムを構築し、このシステムを用いてモータ駆動用ソフトウェアの制御パラメータを自動で適正化する環境を開発した。ここでは、ソフトウェアの品質確保及び開発効率向上のために構築した仮想検証システムの

概要、制御パラメータの自動適正化の方法、及びその検証結果について述べる。

2 PMSM制御の仮想検証システム

今回構築したPMSM制御の仮想検証システムについて述べる。

2.1 仮想検証システムの構成

仮想検証システムの構成を図2に示す。このシステムでは、インバータを制御するマイコンは実機を使用する。インバータ、PMSM、及びモータ負荷はシミュレータ内にモデル化する。

これら仮想検証システムの構成要素について、以下に述べる。

- (1) マイコン 基板上に実装されている実機のマイコンを用いる。インバータ制御用の信号をシミュレータに出力し、インバータモデルを制御する。また、モータモデルから出力される駆動結果を入力する。
- (2) インバータ及びモータ負荷 インバータとモータ負荷は、シミュレータ内に技術計算言語MATLAB[®]及びシミュレーションとモデルベースデザイン環境Simulink[®]でモデル化する。
- (3) PMSM PMSMは、シミュレータ内にMATLAB[®]及びSimulink[®]でモデル化する。更に、電磁界解析ソフトウェアで作成したモータ特性のリストをモータモデルに取り込む。

モータ特性のリストを出力する方法を図3に示す⁽³⁾。2D(2次元)CADで作成された図面データを電磁界解析ソフトウェアに取り込み、図面の座標データから解析モデルを生成し、電磁界解析を実行する。その結果、モータ電流及び、モータ電流位相ごとの誘起電圧とインダクタンスをモータ特性のリストとして出力する。

2.2 仮想検証システムのメリット

このシステムのメリットを以下に述べる。

PMSMの試作には数か月を要するが、このシステムでは、実

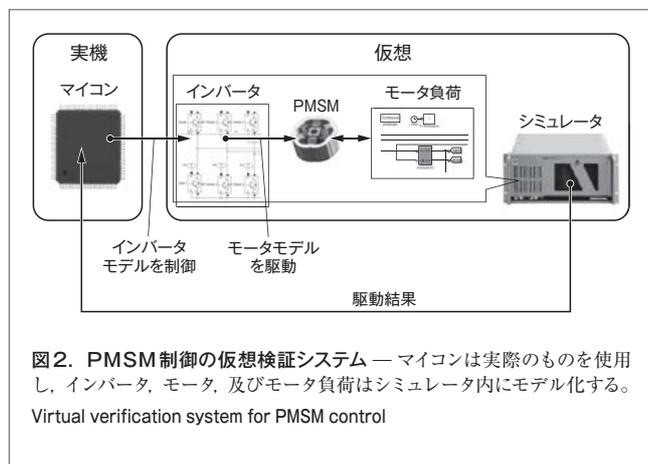


図2. PMSM制御の仮想検証システム — マイコンは実際のものを使用し、インバータ、モータ、及びモータ負荷はシミュレータ内にモデル化する。
Virtual verification system for PMSM control

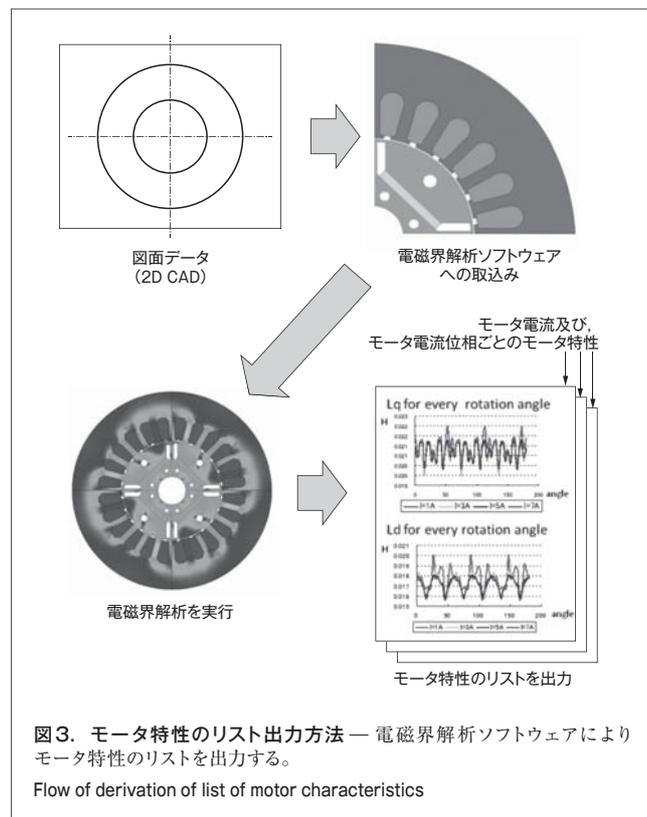


図3. モータ特性のリスト出力方法 — 電磁界解析ソフトウェアによりモータ特性のリストを出力する。

Flow of derivation of list of motor characteristics

際のPMSMを使用しないため、試作前にモータ駆動用ソフトウェアを開発でき、製品の開発期間が短縮できる。また、実際のインバータやモータ負荷も使用しないため、インバータが破損するような過酷な条件での試験を繰り返し行うことができ、製品の信頼性の確保につながる。

3 制御パラメータの自動適正化環境

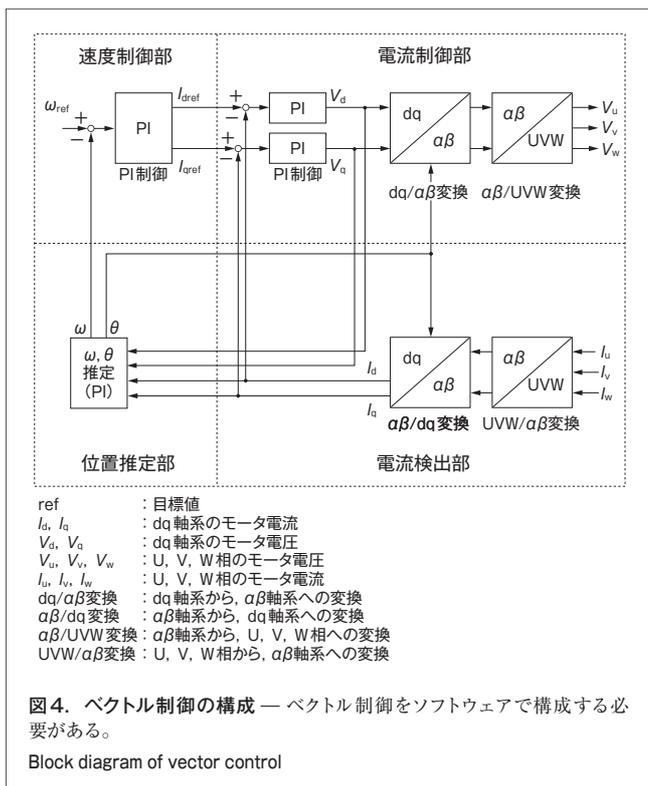
モータ駆動用ソフトウェアの品質確保や開発効率向上のために、仮想検証システムを用いて制御パラメータを自動で適正化する環境を開発した。

3.1 モータ駆動用ソフトウェア

図4にベクトル制御の構成を示す。ベクトル制御は、電流検出部、位置推定部、速度制御部、及び電流制御部で構成される。

電流検出部では、電流センサやシャント抵抗などにより検出した三相(U, V, W相)のモータ電流をdq軸系のモータ電流に座標変換する。位置推定部では、モータ角速度及び角度を演算する。速度制御部では、モータ角速度をPI(比例, 積分)制御してdq軸系のモータ電流指令値を出力する。電流制御部では、dq軸系のモータ電流をPI制御して、逆座標変換しU, V, W各相のモータ電圧を出力する。このベクトル制御をPWM(パルス幅変調)周期ごとに演算する。

このうち、電流制御部、速度制御部、及び位置推定部の各PI制御パラメータは、PMSMの効率や応答性に影響を及ぼす

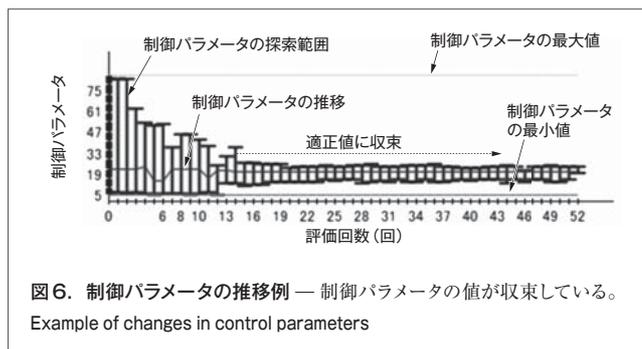
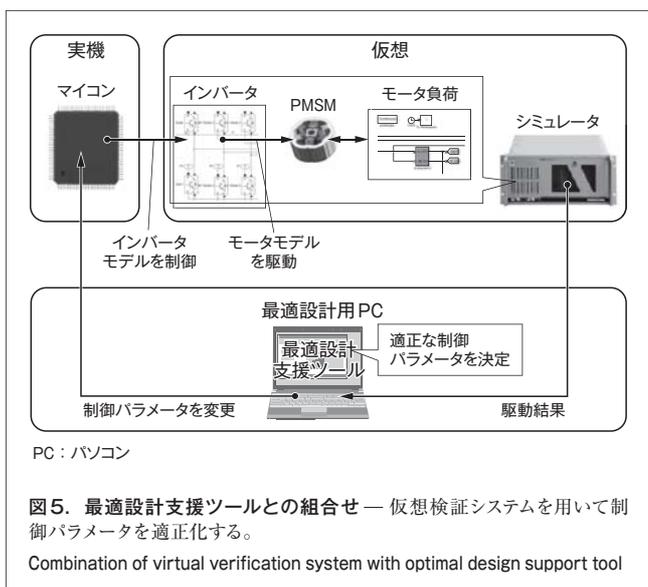


ため、適正值に調整する必要がある。

3.2 制御パラメータの適正化

図5に示すように、仮想検証システムと汎用の最適設計支援ツールを組み合わせ、モータ駆動用ソフトウェアの制御パラメータを自動で適正化する環境を構築した。最適設計支援ツールを用いて、制御パラメータを変更しながらPMSMの効率や応答性の評価を繰り返し、適正な制御パラメータを得る。

電流制御部における制御パラメータの適正化の推移例を図6に示す。横軸は評価回数、縦軸は制御パラメータである。



評価回数が進むに従って制御パラメータの探索範囲が狭まり、一定値に収束していることがわかる。

4 得られた制御パラメータの検証

自動適正化環境で得られた制御パラメータを用いて、図7に示す実際のPMSMを駆動させ、その有効性を検証した。

4.1 制御パラメータの比較

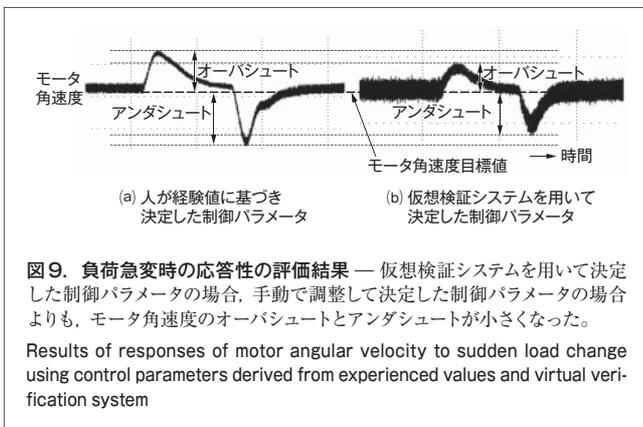
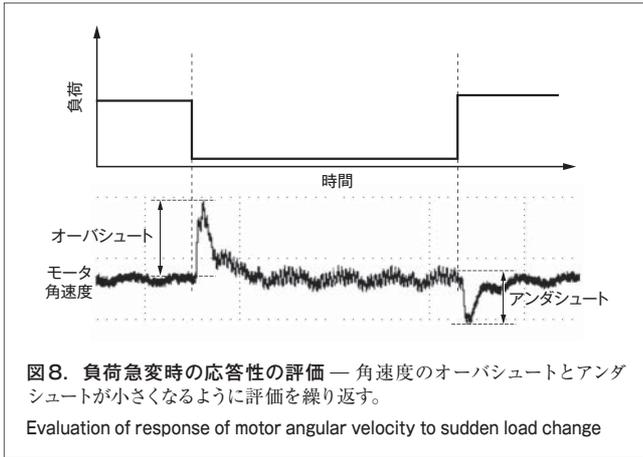
PMSMを搭載した製品では、外乱によりモータ負荷が急変した場合でも、モータが停止することなく安定して駆動する必要がある。そこで、手で調整して決定した制御パラメータと自動適正化環境を用いて決定した制御パラメータで、実際のPMSMを駆動させ、負荷急変時の応答性を比較した。

負荷急変時の応答性の評価は、図8に示すように、負荷条件を急激に変化させたときのモータの角速度のオーバershootとアンダershootが小さくなるように、制御パラメータを変更しながら繰り返し行った。

4.2 検証結果

モータ負荷を急激に変化させたとき、手で調整して決定





した制御パラメータで制御した場合と自動適正化環境を用いて決定した制御パラメータで制御した場合のモータ角速度波形を図9に示す。自動適正化環境を用いて決定した制御パラメータの場合は、手で調整して決定した制御パラメータの場合と比較し、オーバーシュートとアンダシュートが約30%小さくなっていることがわかる。

また、手で調整して決定する場合、調整する人によって制御パラメータにばらつきが生じるが、自動適正化環境を用いて制御パラメータを決定する場合、適正值が求められるため、モータ駆動用ソフトウェアの品質を確保することができる。

このように、自動適正化環境を用いて適正化された制御パラメータの有効性が確認できた。

5 あとがき

PMSM制御の仮想検証システムを構築して、このシステムを用いてモータ駆動用ソフトウェアの制御パラメータを自動で適正化する環境を開発し、その有効性を確認した。

今後は、家電製品や車載製品のモータ駆動システムへの応用展開を目指す。

文献

- (1) 関原聡一 他. エアコン用正弦波駆動インバーターコンプレッサモータの高性能駆動. 東芝レビュー. 57, 10, 2002, p.42-45.
- (2) 鈴木信行 他. 省エネ化を促進できるモータ駆動用ベクトル制御マイコンTMPM370. 東芝レビュー. 67, 1, 2012, p.38-41.
- (3) 野田浩二 他. “空調機へのモータ制御ゲイン仮想検証システムの適用”. 平成25年電気学会全国大会 講演論文集. 名古屋, 2013-03, 電気学会. 2013, p.227-228.

• MATLAB, Simulinkは、MathWorks, Inc.の商標。



鈴木 信行 SUZUKI Nobuyuki

生産技術センター 制御技術研究センター研究主務。
モータ制御マイコン及びインバータの研究・開発に従事。電気学会会員。

Control Technology Research Center



齊藤 徹 SAITO Toru

生産技術センター 制御技術研究センター。
モータ及び磁気応用機器の開発に従事。

Control Technology Research Center