

車載電子モジュール用プラットフォームの開発（第2報）

9 モデルベース開発によるブラシレス DC モータのシミュレーション

倉本丈久, 大賀 誠, 宮野忠文, 長谷川浩治, 問山清和

Development of the Innovative Platform for the electronic module using vehicle applications (2nd Report)
Simulation of brushless DC motor drives using Model Based Development method

KURAMOTO Takehisa, OHGA Makoto, MIYANO Tadafumi, HASEGAWA Koji and TOIYAMA Kiyokazu

Because it is increasing that realized the function of the automotive parts using several electronic circuit and software, the Brushless Direct-Current motor (BLDC motor) is adopted frequently in especially next-generation vehicle. The driving signals for the BLDC motor is designed for each application equipment. Therefore, the parts suppliers have a needs for acquiring the effective development methods of the motor controllers. In this paper, the motor characteristics are grasped beforehand performing the model simulation introducing the Model Based Development method. It provides some methods for designing the BLDC motor controller efficiently.

キーワード：ブラシレス DC モータ, センサレス駆動, モデルベース開発, MATLAB/Simulink

1 緒 言

自動車の環境, 安全, 快適性などの機能向上のため, 自動車部品の駆動を電子部品でサポートする技術が進展している¹⁾。特に, 近年はハイブリッド車や電気自動車の普及によって補機類の電動化が進むなど, 車載部品のエレクトロニクス化は一層進んでいる。

この車載部品の動力源として直流モータ (DC モータ) の利用が増加しており, その中でも長寿命が要求されるものにはブラシレス DC モータが活用されている²⁾。このモータは駆動に電子回路を必要とする上, センサレス駆動を行う場合は駆動回路設計時に起動条件を検討し実装しなければならないなど, 回路開発に経験と時間が必要とされる。

そこで本報告では, ブラシレス DC モータの駆動回路の開発に自動車業界における標準的な開発手法であるモデルベース開発を導入し, あらかじめシミュレーションを行うことで, 効率的な駆動回路の設計を実現したことを述べる。

2 ブラシレス DC モータとは

DC モータは小型で回転力が強く, 速度制御が容易であるなどの利点があり, 一般に広く利用されている半面, 駆動にブラシと整流子を用いるため, ブラシの摩耗に起因する短寿命, 電気ノイズの発生などの欠点を持つ³⁾。

この DC モータから, ブラシと整流子を取り除く代わりに MOSFET などの半導体スイッチを含む駆動回路を用いることで欠点を解消したのがブラシレス DC モータで

ある。図1にブラシレス DC モータの動作原理を示す。このモータの駆動は, ステータのコイルに電流を流すことで極性を発生させ, ロータの永久磁石を吸引・反発させることで行う。コイルに流す電流の方向は, ロータの位置に応じて6個の半導体スイッチを ON/OFF することにより切り替えるため, ロータ位置の検出が必要である。

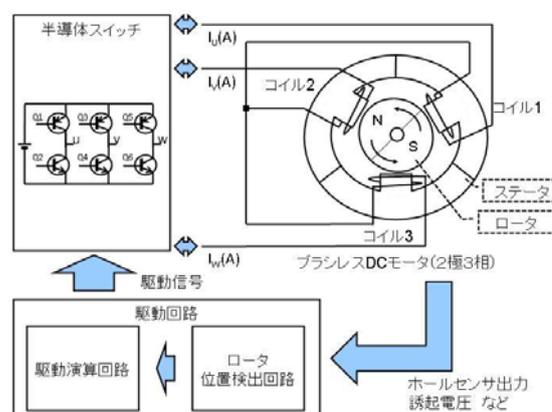


図1 ブラシレス DC モータ動作原理 (スター結線)

このロータの磁極位置検出には, 次の方法がある。

(1) ホール素子などのセンサを用いる方法

モータの停止・回転に関わらずロータの位置が検出できるため, 起動やダイナミックな変速が容易であるという利点を持つが, 配線の増加や, ホール素子を用いる場合は特性が熱により変動するなどの欠点がある。

(2) センサを利用しない方法 (センサレス)

機構設計の自由度が高いという利点があるが, モータがある程度回転しないと誘起電圧からロータの位置を求

められないため、モータ起動時や低速時の駆動が難しいという欠点がある。

3 モデリング及びシミュレーション結果

モデルベース開発とは開発対象となるシステム（制御対象及びコントローラ）を記述したモデルを仕様として定義し、そのモデルを拠り所とした設計・検証で開発を進める手法である。この手法の利点として、組込みソフトウェアの開発効率の向上が期待できることなどが挙げられる⁴⁾。

本報告では開発ツールとして自動車分野の設計開発に標準的に利用されている MATLAB/Simulink と、モータなど電気系ツールを扱う SimPowerSystems を用いて、モータの特性評価、センサ駆動による駆動状態の確認及びセンサレス駆における起動パラメータの検討を行い、実際に駆動回路を試作した。

3.1 モータ特性評価シミュレーション

モータの特性を評価するためのモデルを作成した。図2に作成したモデルのブロック図を示す。

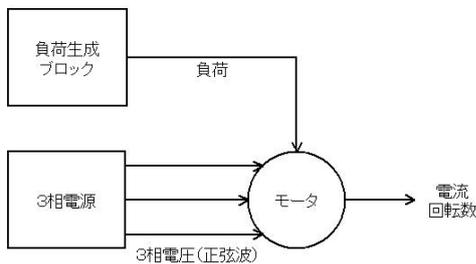


図2 特性評価モデルのブロック図

まず、モータを無負荷とし、 120° の位相差を持つ3相の正弦波を発生する電源を用いてモータに電圧を印加する。これによりモータが回転を始め、正弦波の周期に応じた回転数で安定する。この状態からモータにかかる負荷を増加させると、負荷がある値となったところでモータは脱調するので、そのときの負荷、電流及び回転数の値を計測する。この操作をモータに印加する正弦波の周波数を変えながら繰り返すことで、負荷トルクと電流の関係及び負荷トルクと回転数の関係が求められる⁵⁾。これらの特性から、無負荷電流値や最大回転数、負荷運転時の回転数などを求めることができる。

今回のシミュレーションでは、モータの各種データが公開されている MAXON 社のブラシレス DC モータ（商品名 EC モータ：型番 167176）を用いることとした。このモータのデータシートを表1に示す。

表1 MAXON EC モータ (167176) データシート⁶⁾

項目	パラメータ
公称電圧	12 V
公称電圧時の無負荷回転数	10,300 rpm
公称電圧時の無負荷電流	886 mA
端子間抵抗	0.134 Ω
端子間インダクタンス	0.0266 mH
トルク定数	11.0 mN・m/A
ロータ慣性モーメント	85.0 g・cm ²
回転数/トルク勾配	10.5 rpm/mN・m
永久磁石磁極ペア数	1

このモータの特性シミュレーション結果と、パラメータから求められるモータ特性の理論値との比較を図3に示す。この図から分かるように、シミュレーション結果は、理論値とよく一致することから、このモデルでモータの特性評価が可能である。

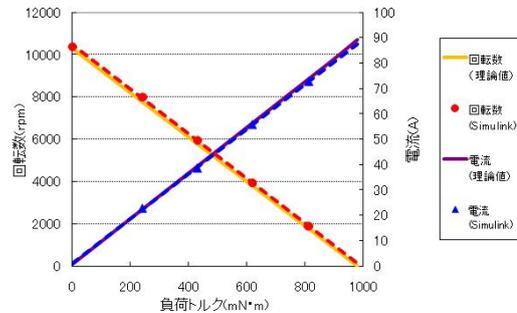


図3 モータ特性評価結果

3.2 センサ付き駆動シミュレーション

ブラシレス DC モータの駆動状態を確認するため、ホール素子を用いてモータを駆動させるモデルを作成した。図4に作成したモデルのブロック図を示す。

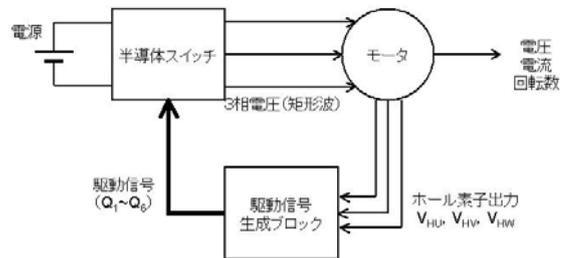


図4 ホール素子によるモータ駆動モデルのブロック図

SimPowerSystems で用意されているブラシレス DC モータのモデルからは、ホール素子の信号 V_{HU} , V_{HV} , V_{HW} が引き出せるため、この信号を元に図5の Q1~Q6 に示すような駆動信号を作成する⁷⁾。この駆動信号で6つの半導体スイッチ（図1参照）をそれぞれ ON/OFF し、モータ

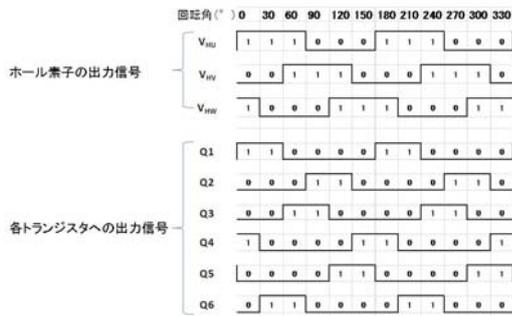


図5 ホール素子の出力と駆動信号の関係

に入力する電圧をスイッチングすればモータが駆動する。

このモデルを用いてホール素子によるモータ駆動シミュレーションを行った。表1のモータを用いて、無負荷で駆動させた際の回転数、各相の電圧及び電流波形の結果をそれぞれ図6、図7、図8に示す。

モータの機械的時定数は、回転数が最終値の63.2%に達するまでの時間であり、図6から0.012(s)であることが分かる。また、図7及び図8から電圧と電流の位相関係、誘起電圧の時間変化及び電流の推移がシミュレーションで確認出来ることが分かる。

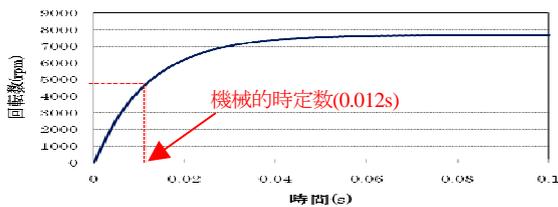


図6 モータ回転数結果 (ホール素子)

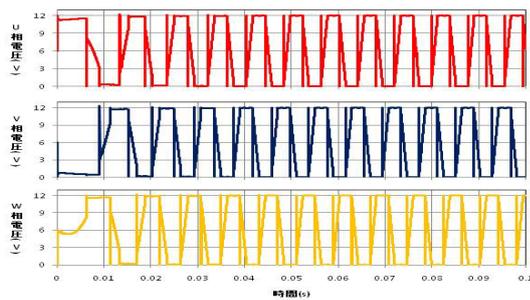


図7 各相電圧波形

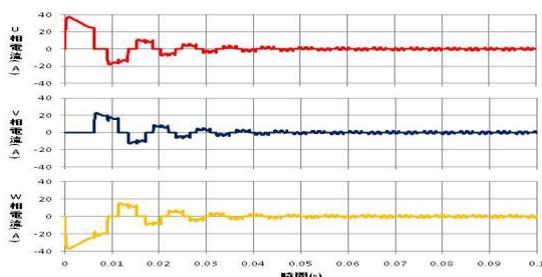


図8 各相電流波形

3.3 センサレス駆動シミュレーション

モータをセンサレスで駆動する場合のモデリングを行った。図9に作成したモデルのブロック図を示す。

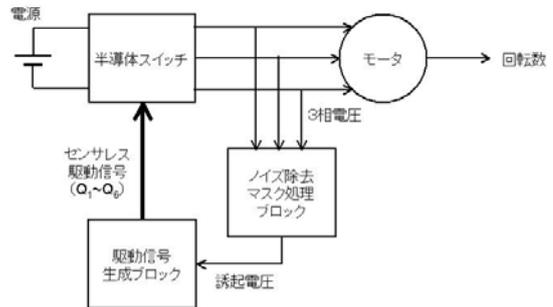


図9 センサレス駆動モデルのブロック図

センサレスでモータを駆動させるには、モータが回転することによって駆動コイルに発生する誘起電圧を検出し、この値が駆動電圧の2分の1となるタイミング(ゼロクロス点)を元にセンサレス駆動信号を生成すればよい。しかし、駆動コイルには、図10のように駆動電圧、誘起電圧のほか、半導体スイッチがONからOFFに切り替わる時に生じるスイッチングノイズが混入しているため、ノイズ除去やマスク処理⁸⁾を行うことによって精度よく誘起電圧を検出出来るようモデルを作成した。

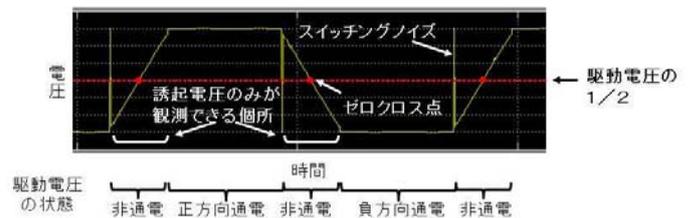


図10 駆動コイルに生じる電圧の波形

このようにして得られた誘起電圧のゼロクロス点の信号はホール素子の信号に比べて30°位相が進んでいるため、位相を30°遅らせてセンサレス駆動信号を生成し、半導体スイッチをON/OFFさせることでモータを駆動させればよい。

しかし、モータが停止している状態では誘起電圧が生じないため、モータの起動時には何らかの方法でモータを強制的に回転させる必要がある。これを強制転流といい、特定の周波数(強制転流周波数)からなる矩形波信号を半導体スイッチに入力することにより行う。このことでモータは回転を始め、駆動コイルに誘起電圧が生じる。この誘起電圧からセンサレス駆動信号を生成し、タイミング良く半導体スイッチに入力する信号を強制転流からセンサレス駆動信号に切り替えれば、安定したモー

タ駆動が可能である。

強制転流周波数は、モータの駆動回路設計時の重要な要素であり、強制転流周波数の設定が不適切だとモータが起動できないなどの問題が生じる。そこで、強制転流周波数を変化させた場合における、モータの起動時間（モータが起動から定常状態となるまでに要する時間）の変化についてシミュレーションを行った。表1のモータを用いて、無負荷で、センサレス駆動への切り替え時間を0.015(s)とした場合の、モータ起動時間を表2に示す。

表2 強制転流周波数によるモータ起動時間の変化

強制転流周波数(Hz)	モータ起動時間(s)
10	回転せず
20	0.080
30	0.070
40	0.065
50	0.060
60	0.055
70	0.055
80	0.065
90	0.090

この表から、強制転流周波数によりモータの起動時間が変化することが分かる。このときのモータの回転数の推移を比較するため、モータ起動時間が最も短かった強制転流周波数60Hzの場合と、その半分の周波数30Hzの場合のモータ回転数の推移を図11に示す。この図から、60Hzの場合は強制転流からセンサレス駆動への切り替えが滑らかであるが、30Hzの場合は、センサレス駆動切り替え前後にモータが一時的に減速するため、結果として起動に時間を要している。このことから、モータ起動時間が短くなるよう強制転流周波数を設定すれば良いことが分かる。

この結果を元に、実際にモータの駆動回路を試作した。その外観を写真1に示す。今回用いたセンサレス制御用

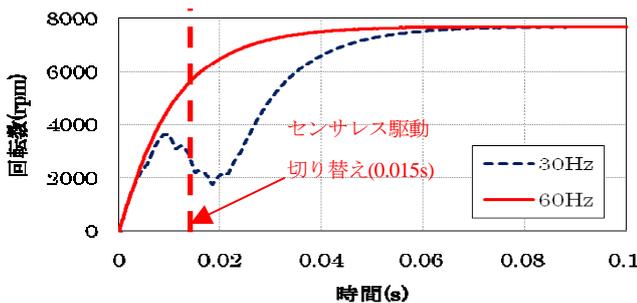


図11 モータ回転数推移

IC は、強制転流周波数の設定として 6.5Hz, 13Hz, 26Hz, 52Hz, 104Hz, 208Hz, 417Hz の7通りが設定可能である。この中から、モータ起動時間が短かった周波数 60Hz または 70Hz に最も近い 52Hz を選択しモータを起動したところ、問題なくモータの駆動を行えることを確認した。このようにモデルシミュレーションを行うことで、事前に必要なパラメータを検討することが可能となり、駆動回路作製を効率的に行うことが出来る。

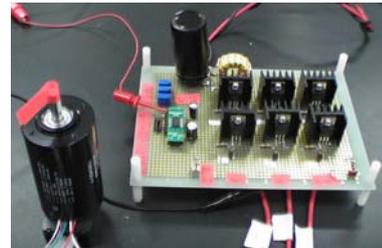


写真1 試作したモータ駆動回路

4 結 言

ブラシレス DC モータの駆動回路設計をモデルベース開発で行った。本手法を用いる利点として次の2点が挙げられる。

- (1) 実機を用いずにモータの駆動状態確認及び特性評価が可能である。
- (2) モデルシミュレーションの実施により駆動回路に必要なパラメータを回路作製前に検討できるため、設計時間が短縮できる。

これらのことから、本手法を用いることでブラシレスモータの駆動回路設計を効率的に行うことが出来る。今後はこのシステムをモデルケースとして、実際のブラシレス DC モータの駆動回路設計に活用していく。

文 献

- 1) 広島県：ひろしまカーエレクトロニクス戦略, 2008
- 2) 見城：使いこなす DC モータ技術 日刊工業新聞社, 2008
- 3) 萩野：Interface , 1(2010)
- 4) 大賀他：広島県立西部工技研究報告, 52(2009), 1
- 5) The Mathworks, Inc. : DC ブラシレスモータ駆動システムのシミュレーション, 2009
- 6) MAXON : EC モータ データシート
- 7) 見城・佐渡：イラスト・図解 小型モータのすべて 技術評論社, 2001
- 8) トランジスタ技術編集部：小型 DC モータの基礎・応用 CQ 出版社, 2006