

ブラシレスモータのセンサレス制御技術の開発

Development of Drive Method for Brushless Motor without Hall-sensors

服部 昌 M. HATTORI 吉浪弘治 K. YOSHINAMI

Regarding automobile drive train, it becomes important that hydraulic pressure works "on-demand" to reduce gas emission and save fuel. For this purpose, electric pump units should be adopted instead of engine-driven pumps. In order to use an electric pump unit in the drive train, a motor must have enough reliability on heat-resistance, dust-proof and the likes. Therefore a brushless motor without using hall sensors is desirable for automobile drive train applications. But some technical means are needed to drive sensorless-brushless motor. This paper describes the developed method to drive brushless motor without hall-sensors.

Key Words: brushless motor, sensorless

1. はじめに

従来、車載用駆動系や操舵系にはブラシ付きのDCモータが用いられてきたが、ブラシの耐久性からくる信頼性の問題があり、ブラシレスモータ化が望まれる。しかし、エンジンルーム内搭載を考えるとブラシレスモータにもホール素子の熱特性の問題があり、ホール素子を用いず磁極検知を行いモータを駆動することが必要である。

ブラシレスモータのセンサレス駆動は家電用モータの世界ではすでに多く実用化され¹⁾、センサレス駆動用のデバイスも販売されているが、車載用油圧系のオンデマンド駆動には、油圧を短時間で所要値まで立ち上げることが必要とされ、家電用とは異なった手法が必要となる。同時に信頼性とコストという相反することの両立が望まれ、高性能なマイコンを用いた複雑なアルゴリズムによる制御よりも、できるだけ小規模な回路構成と単純でループ応答の速いアルゴリズムによる制御系を構成する必要がある。

今回、こういった観点から、より実用的であることに主眼をおいたブラシレスモータのセンサレス駆動方法(回転数制御)の開発を行った。

2. センサレス制御の手法

2.1 磁極位置推定

ブラシレスモータをセンサレスで駆動するためにはロータの位置情報をモータの誘起電圧から推定することが一般的である。この磁極推定方法にはアナログ方式とデジタル方式があるが、共に何らかの長所と短所を持ち合わせている。

アナログ方式は構成が簡単でPWM駆動との相性も良いが、誘起電圧をフィルタに通した後、ロジック回路で処理するため、フィルタの特性により加減速範囲や回転域が限定されてしまう欠点がある。

一方、デジタル方式は可変速範囲が広く、最近の機器はマイコンを搭載していることから回路の大きな追加なしで済むため、多くはこちらを採用しているが、PWM制御との相性が良くないという欠点も持っている。

通常120°通電方式ではコイル駆動の60°の休止区間に現れるモータの回転数に比例した逆起電力波形を利用するが、PWM駆動を用いるとPWMのオフ区間では誘起電圧は検知できないという問題がある。このため本開発では、上側アームはPWMを行わず通電中はON固定とし、下側アームのみPWM駆動を行い、相電圧のコンパレータ信号を用いてデジタル積分するという手法をとった。

以下、磁極位置推定の方法を具体的に述べる。

まず、図1に示すように相信号は基準電圧と比較され、このコンパレート信号がMPUのポートへ入力される。読み込みはPWMのスイッチングノイズの影響を避けるため、PWMキャリアの三角波のピークのタイミングで行う(図2)。

図3は相電圧信号から磁極位置推定信号を得る方法である。

回転中の相電圧は図3(a)のようになり、コンパレータ信号は相電圧のゼロクロス点で反転する。通電はこのゼロクロス点に対し電気角で30°遅らせて開始する必要がある。

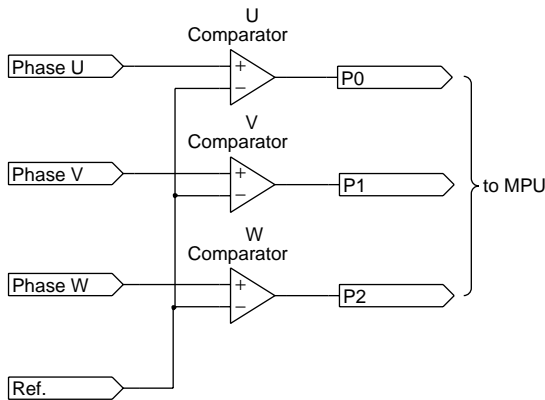


図1 相信号読み取り部の構成
Reading system of phase signal

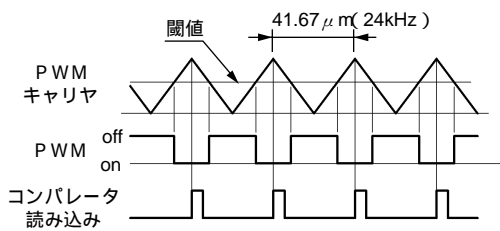


図2 コンパレータ値の読み込みタイミング
Read-in timing of comparator value

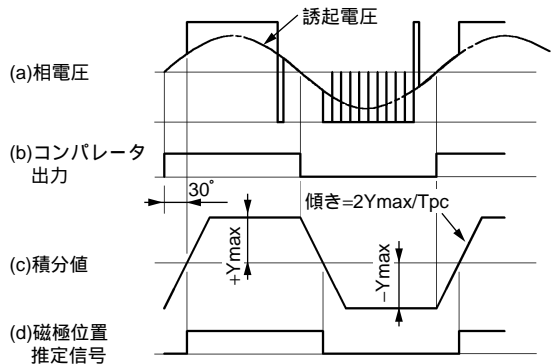


図3 ローター磁極位置の推定方法

The method to estimate the magnetic pole position of the rotor

このため、図4に示される60°毎の駆動パターン切換信号の周期 T_{pc} と積分に飽和特性を持たせるための上下限值 $\pm Y_{max}$ を用い、

$$Y = Y_{max} / (T_{pc}/2)$$

として

- コンパレータ値が1ならば $Y = Y + Y$
- この時 $Y > Y_{max}$ ならば $Y = Y_{max}$
- コンパレータ値が0ならば $Y = Y - Y$
- この時 $Y < -Y_{max}$ ならば $Y = -Y_{max}$

と積算を行う。

さらに、

$$Y > 0 \text{ ならば } 1$$

$$Y = 0 \text{ ならば } 0$$

を出力すると、ゼロクロス点から30°遅れて磁極信号が現れる(図3(c), (d))。

U, V, Wは120°の位相をもっているため、3相の磁極推定信号を並べると図4のHU, HV, HWのようになる。この図に示されるように、磁極推定信号(HU, HV, HW)の状態により(U, V, W)の駆動パターンが決まり、状態遷移が起こる時間を計測することにより回転数が得られる。

この方法によれば、Yを所定計算値から変化させることにより進み角制御も容易である。

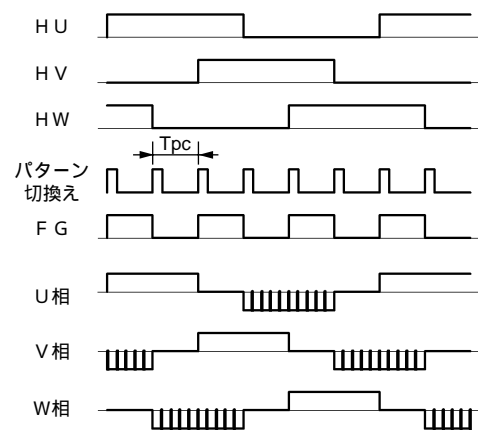


図4 通電信号の生成

Generation of energizing signal

2.2 起動とセンサレスモードへの切換

停止状態のモータは誘起電圧を発生しないため、同期モードで強制転流を行い起動する。

起動時は設定回転数に応じた電圧(PWMデューティ)を用い、1000min⁻¹まで同期駆動を行う。

回転数が1000min⁻¹に達すると、センサレスモードに切り替わり、設定回転数 f_{set} と現回転数 f の比較を行い、回転数に応じた駆動電圧(PWMデューティ)を与えるが、偏差($f - f_{set}$)に比例した出力値を与えるのではなく

- $f_{set} > f$ ならば PWM₊ PWM₊ PWM₊
- $f_{set} < f$ ならば PWM₋ PWM₋ PWM₋

とコンパレータを用いた加減算を用いた。これは、比例制御によるハンチングや脱調を防ぐためであり、系が安定であることを何よりも優先させた。

応答性に関しては処理速度に影響する演算を極力排して制御ループを速くする事で対応している。

3. 油圧系への実装結果

開発したモータドライバにモータおよび油圧ポンプ，油圧系を接続して測定を行った。

モータおよび油圧ポンプの諸元を表1に，モータとポンプを接続した写真および油圧の測定系を図5，図6，油圧の立ち上がりの計測結果を図7に示す。

表1 電動ポンプの仕様
Specification of electric pump

モータ	形 式	三相ブラシレスモータ
	定 格 出 力	59W
	最 大 回 転 数	4 000min ⁻¹
	最 大 ト ル ク	0.8N・m
	定 格 ポ イ ン ト	0.2N・m / 2 880min ⁻¹
ポンプ	形 式	外接型歯車ポンプ
	基 本 吐 出 量	1.5cc/rev
	最 大 油 圧	2 MPa
	機 械 効 率	60%

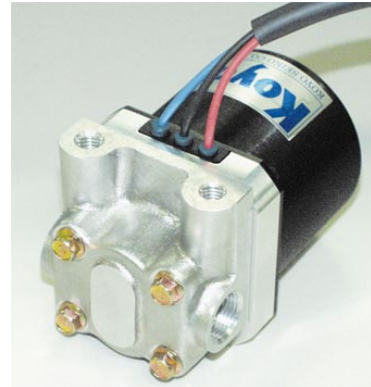


図5 電動ポンプ
Electric pump

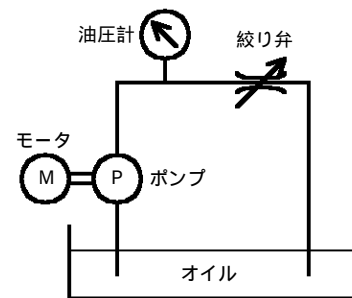
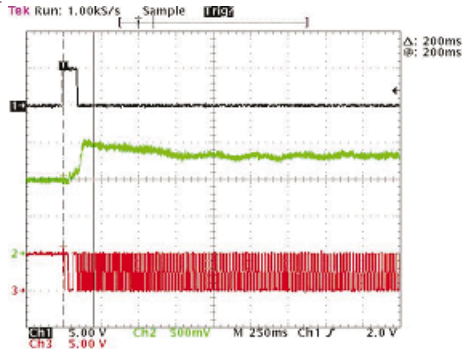
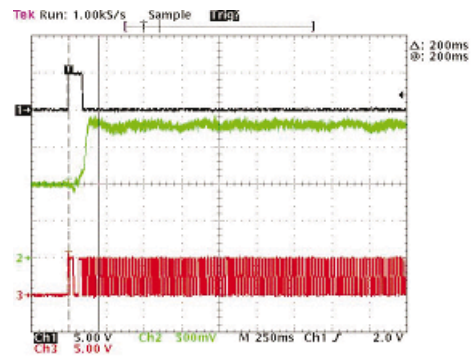


図6 油圧測定系
Measuring system of hydraulics

設定回転数1 000min⁻¹

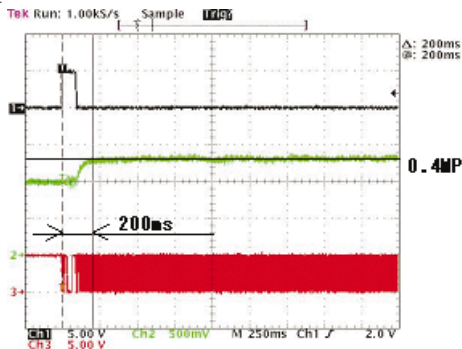


0 0.4MPa立ち上がり

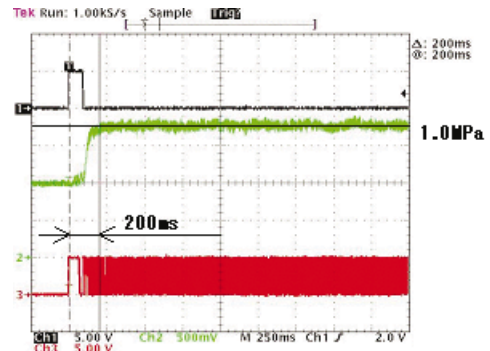


0 1.0MPa立ち上がり

設定回転数3 000min⁻¹



0 0.4MPa立ち上がり



0 1.0MPa立ち上がり

図7 油圧立ち上がりの測定結果
Measurement result of hydraulic start-up

低速・低負荷では油圧のオーバーシュートが見られるが、負荷が大きくなるとオーバーシュートはなくなる。

高回転ではスムーズな立ち上がりを見せ、強制転流からセンサレスモードへの移行もスムーズに行われている。油圧の立ち上がりは、起動時の電圧設定により図7以上の高速化は可能であるが、高速・高負荷条件では強制転流からセンサレスモードへの移行時に停留区間が生じることがあるため、起動安定性を優先した。

4. おわりに

安価で実用的なブラシレスモータのセンサレス駆動を目的にA/D/D/Aを用いない回転数制御方法の開発を行った。

本方式は、元々アナログ回路で実現していたセンサレス駆動²⁾の処理をアレンジしてワンチップマイコンに組み込んだものである。そこに用いたアナログ回路は、一般的なアナログ方式センサレス駆動のように、1/2位相フィルタを用いないため、高速な立ち上げとアナログ式の欠点であった回転数範囲の制限をなくすことを実現したものである。しかし、アナログ回路はドリフトの問題などもあり、最近のようにあらゆるものがマイコン内蔵となると、その処理をマイコンに組み込むことが前提となる。その時、コストを考えると付加される部分についてもマイコンのグレードを上げることなく組み込めるシンプルなアルゴリズムが必要となる。

今後は車載用途に限らず、産業・民生を問わずモータの必要性がさらに増大する。

モータの制御についても高度な技術が次々と発表されているが、これらの処理は組込マイコンにはまだまだ厳しい。最新技術のエッセンスをシンプルなアルゴリズムにまとめ、コスト面まで含めて真に実用的な技術を提供するよう努めていきたい。

参考文献

- 1) 長竹和夫：家電用モータ・インバータ技術，日刊工業新聞社(2000)
- 2) 阪田隆敏，横井弥壽雄：Koyo Engineering Journal, no. 159(2001) 74.

筆者



服部 昌*

M. HATTORI



吉浪弘治**

K. YOSHINAMI

* 総合技術研究所 機械システム研究部

** 軸受事業本部 ユニット技術部