



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

TECHNICAL NOTE

はじめに

電気モータは、ハンガリーの物理学者イエドリック・アーニョシュが自身の発明である整流子を基に19世紀初めに初の連続回転DCモータを創り出して以来ずっと、我々の身近にありました。電気モータは20世紀初頭にかけて工業、農業に革命を起こし、洗濯機や冷蔵庫など、家事労働を省力化する家電製品を実現しました。今や電気モータは、大型クルーズ船から埋め込み型医療機器に至るまで、あらゆるものの原動力となっています。

モータには実に多くの種類がありますが、どのモータにも「電機子」「界磁磁石」「整流子」という3つの基本的な部品が含まれています。電機子とは導電コイルのことであり、普通は、周囲に界磁磁石を配した状態で回転軸に取り付けられます。界磁磁石には、界磁巻線、永久磁石のどちらも使えます。電機子に電流が流れると、界磁電流に対抗する磁界が生じて、その結果、軸を回転させる起電力(EMF)が生じ、機械的トルクが発生します。整流子とは、電機子軸に取り付けられた一連の接触子のことであ

り、回転する電機子に流れる電流の向きを絶えず反転させる働きをします。それによってモータが連続回転します。

モータは機械的にはむしろ単純ですが、それを説明する用語に戸惑うことが多々あります。機械用語では、モータの回転部を「回転子」、動かない部分を「固定子」と呼びます。電気用語では、モータの動力生成部のことを「電機子」と呼びますが、電機子は設計次第で回転子になることもあれば固定子になることもあります。「界磁」とはモータの磁界発生部のことですが、これもやはり、回転子になることもあれば固定子になることもあり、電磁石が使われることもあれば永久磁石が使われることもあります。これらの用語は一般に区別なく使われることが多く、混乱の元です。

DCモータには、「ブラシ・モータ」「ブラシレス・モータ」という2種類の基本型があります (Figure 1)。それぞれ順番に説明します。

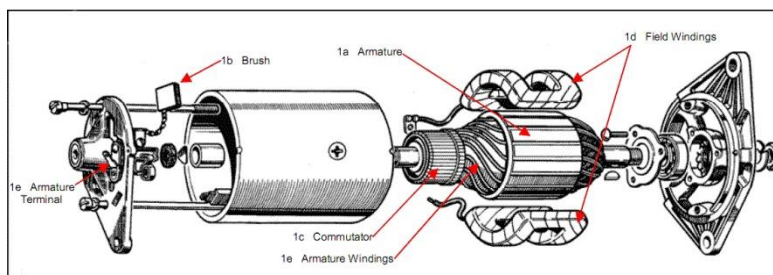


Figure 1. Motor Components

ブラシDCモータ

ブラシDCモータは、最も単純で最も古くからある電気モータです。欠点はいくつかありますが、安価であり、トルク制御や可変速用として今も広く使われています。

ブラシDCモータは、固定子、電機子、整流子、ブラシという、少数の単純な部品で構成されます。固定子は、複数の界磁コイル(巻線界磁)が2つの半球

形永久磁石(PM)がいずれかで構成されます。モータ内部で回転する電機子は、いくつか分割された整流子片に接続された複数のコイルで構成されます。整流子は、DC電源に接続されたブラシとの接点として働きます (Figure 2)。

DC電源からブラシと整流子とを介して電流が流れ、コイルに流れた電流によって磁界が発生しま

す。この磁界は固定子の永久磁石の磁界とは反対方向であるため、それによって電機子が回り始めます。機械的整流作用によって電流の向きが変化し、回転運動が生じます。2極モータの場合は、整流子によって半回転ごとに電流の向きが反転しますので、それによってモータが連続的に回転します。

モータの速度は、印加される電圧に正比例します。モータのトルクは、流れる電流に正比例します。ブラシDCモータは、印加する電圧を変えるだけで速度の制御ができます。逆方向に回転させる場合は、印加する電圧の極性を逆にするだけで済みます。電源を切れば回転は止まります。

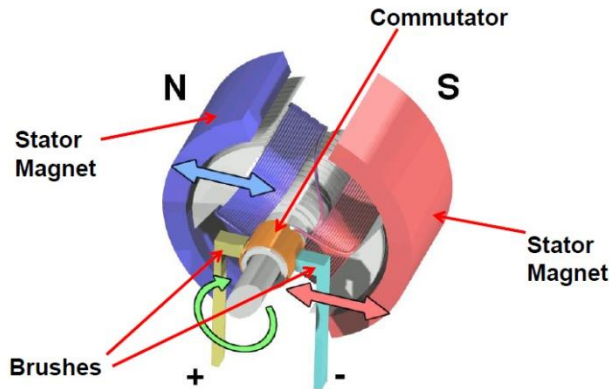


Figure 2. Brushed PM DC Motor

ブラシDCモータには、他のモータにない次のような利点があります。

- 構造が単純で安価
- 駆動用の複雑な電子装置が不要
- 回転速度が電機子電圧に正比例する
- 構造が単純で、同じサイズのブラシレスDCモータの半分のコストで済むことが多く、設計期間が短くなる

しかし以下に示すように、大きな欠点がないわけではありません。

- ブラシは絶えず擦られるため、摩耗しやすい。
ブラシ、スプリングはときどき交換する必要がある
- 整流子は定期的に清掃または交換が必要
- 絶えずアーク放電が生じるため、近くの電子機器に干渉するおそれのあるEMIの発生原因となる
- 回転子の慣性が問題になることがある。また、どうしても整流子が必要なため、同等のブラシレスDCモータに比べて大きくなる。
- コイルの回転による発熱という問題が常につきまとう

ブラシDCモータの使われる環境も、モータの寿命に大きく影響することがあります。乾いた温かい環境だと、ブラシが摩耗しやすくなるうえ、整流子と軸受の故障が早まります。低温にしたうえで外部から強制空冷を行えば、性能は上がるでしょう。

しかし温度を下げすぎると潤滑油の粘性が増してしまい、モータを動かすのに必要な電流の増える原因となります。

巻線界磁型ブラシDCモータ

ブラシDCモータには2種類の基本型があります。1つは、固定子が界磁コイルで構成されたものです。もう1つは、固定子に永久磁石を使ったものです。巻線界磁コイルには以下の3種類があります (Figure 3)。

- 「分巻」：界磁コイルがブラシを介して電機子コイルと並列接続されます (Figure 3A)。
- 「直巻」：界磁コイルが電機子のコイルと直列接続されます (Figure 3B)。
- 「複巻」：別々の界磁コイルが、1つは電機子コイルと直列に、1つは電機子コイルと並列に接続されます (Figure 3C)。

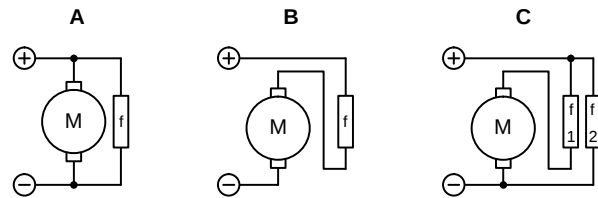


Figure 3. Field Coils: (A) Shunt, (B) Series, (C) Hybrid

永久磁石型ブラシDCモータ

ネオジム磁石の開発されるまで、永久磁石 (PM) 型ブラシDCモータは小さな負荷しか扱えませんでした。しかし現在では、相当大型の民生機器、産業機器に普通に使われていて、出力1馬力以下の用途では一番多く使われています。1886年に始まった商業的利用の分野では、今でも世界で最もよく使われているDCモータです。

ブラシDCモータの駆動

ブラシDCモータの駆動は、原理は簡単ですが、実際はそれほどシンプルではありません。極端に単純化すれば、電源につないで回転させる、可変抵抗で速度を変える、スイッチで回転方向を切り替える、ただそれだけです。別の製品の一部分としてモータを組み込む場合は、ドライバICと何らかの制御回路が必要です。

Figure 4は、オン・セミコンダクター製LB1938FAのブロック図です。LB1938FAは、チャンネル数1の正転/逆転ブラシ・モータ・ドライバICです。低電圧用途として低飽和出力を特徴としています。モータはHブリッジによって駆動されます。ブラシ・モータですので、Hブリッジはスパーク・キラーで保護されます。制御ブロック内の論理回路がCPUからの指令に従ってモータの回転速度と回転方向とを決定します。LB1938FAには、2つの入力信号で制御する「正転」「逆転」「制動」「待機」の各モードがあります。ノートPC、デジタル・カメラ、携帯電話などの携帯機器に使うことを目的としたICです。

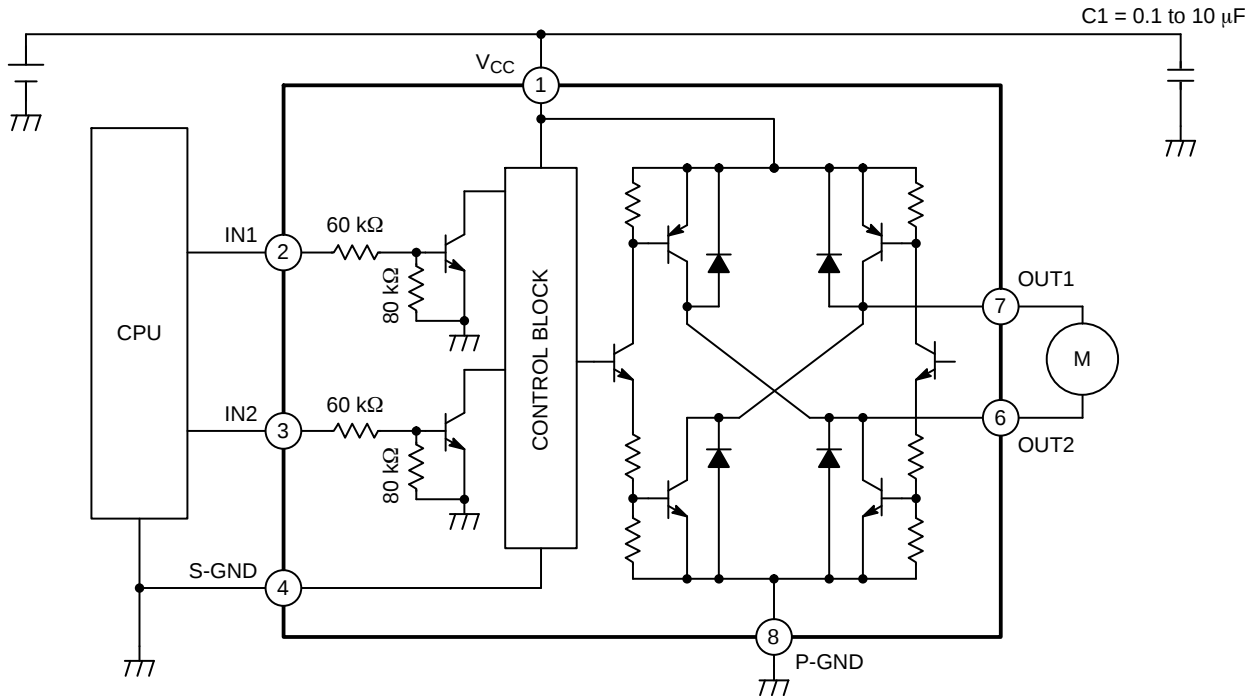


Figure 4. Motor Components

ブラシレスDCモータ

ブラシDCモータには大変長い歴史がありますが、ブラシレスDCモータが本領を発揮し出したのは1960年代に入ってからにすぎません。ブラシレスDCモータは、ブラシDCモータに比べると、効率が遙かに高く、相当な長寿命であり、単位重量あたりのトルクが大きいという特徴があります。

ブラシレスDCモータは、永久磁石を回転子にして、界磁コイルをトランジスタで駆動します。そのためブラシが不要となり、ブラシの欠点も解消できます。この構造は「インナロータ」と呼ばれ、最も一般的です。それとは逆に、電機子コイルを固定子として使い、その周囲を永久磁石が回転してモータ出力軸を駆動するという方法もあります。この構造は「アウトロータ」と呼ばれます。どちらの構造も

コイルは固定されて動きません。ブラシレスDCモータは、機械的動作で整流するブラシ・モータと区別して「電子整流モータ(ECM)」と呼ばれます。

ブラシレスDCモータは、回転子の位置を絶えず検出するための何らかの手段だけでなく、高度な電子制御回路が必要です。回転子の位置は、ホール効果を利用したセンサでも検出できるし、モータが回転しているときの各電機子コイルの逆起電力(BEMF)の変化を測定することでも検出できます。

ブラシDCモータの速度は印加電圧によって決定されますが、ブラシレスDCモータの速度はスイッチング周波数によって決定されます。ブラシレスDCモータは、Figure 5に示したようにPWMパルスによって駆動されます。

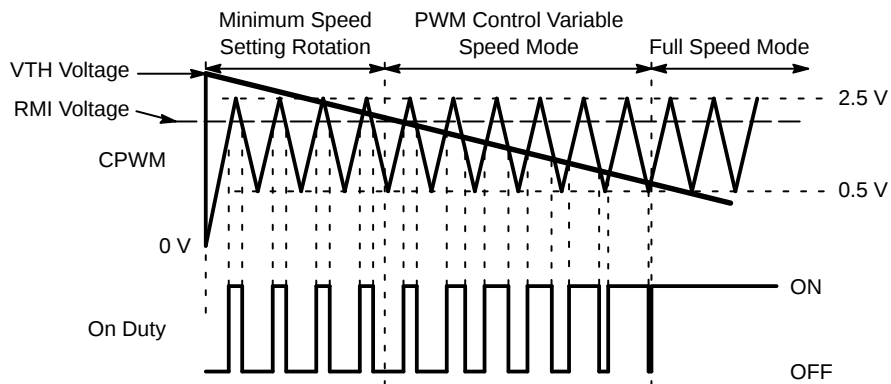


Figure 5. PWM Drive for a BLDC Motor

ブラシレスDCモータには、「単相」「2相」「3相」という3種類の基本型があります。いずれも動作原理は同じです。機械的整流子で回転子コイルの磁気極性を変えるのではなく、トランジスタで固定子コイルの位相を連続的に変化させてモータを回し続けます。単相ブラシレスDCモータは低出力用に使われます。2相方式は、中出力の用途によく使われます。3相方式は主にディスク・ドライブやDVDプレイヤーの駆動用に使われます。Table 1に示したように、それぞれに特徴があり、ふさわしい用途も異なります。

Table 1. BLDC MOTOR CHARACTERISTICS

	Single-phase	2-phase	3-phase
Cost	Good	Excellent	Fair
Silent	Good	Fair	Excellent
Efficiency	Good	Fair	Excellent

単相ブラシレスDCモータ

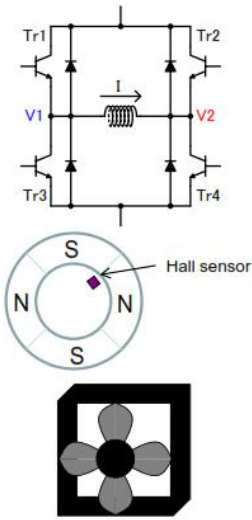
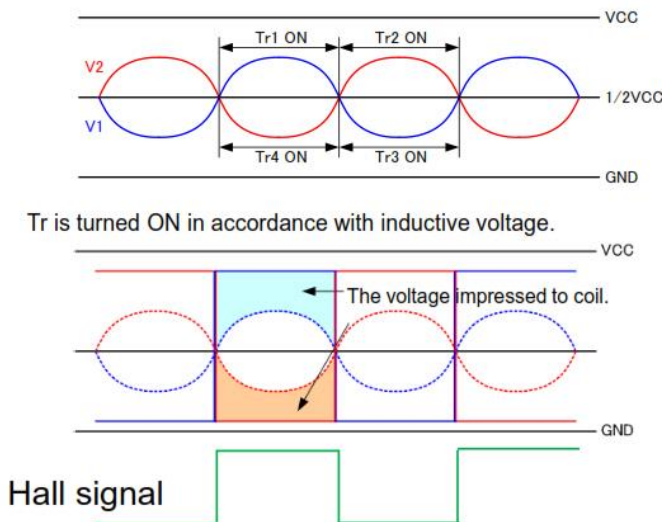
単相ブラシレスDCモータは、並列接続された2つの電機子巻線で構成されます。電機子巻線は、PWMで制御されるHブリッジによって駆動されます。1個のホール・センサからの出力によって、電機子コイルを流れる電流の向きを連続的に反転し、それによってモータを回し続けます(Figure 6)。駆動するのは簡単であり、必要なのはせいぜいLB11970RV (単相全波ドライバ)1個とキャパシタ数個くらいです。

2相ブラシレスDCモータ

2相ブラシレスDCモータのほうは若干複雑です。電機子は4個のコイルで構成され、界磁は4組の永久磁石で構成されます。各電機子コイルすべてが対になるため、単相方式に比べて大きなトルクを発生します。2相ブラシレスDCモータは一般に、重要性の低い廉価品(大型冷却ファンなど)に使われるので、バイポーラ・トランジスタと低電圧・定電流ドライバとで駆動すれば、高度な制御回路は省くことができます。他の構造のブラシレスDCモータに比べると、静音性と効率は劣るにせよ、耐久性が高く、安いという特徴があります。2相ブラシレスDCファン・モータ・ドライバの代表例には、オン・セミコンダクターのLB1868Mがあります。

(1) Single phase full-wave drive

Inductive voltage during motor rotation



Switching timing of TR is determined by Hall signal

Figure 6. Single-phase BLDC Motor Control

3相ブラシレスDCモータ

3相ブラシレスDCモータの場合は、3組の電機子コイルに作用する整流状態が6つ存在します。3つのホール・センサは、交番磁界を発生する固定子コイル

に配置されるのが一般的です。ホール・センサは、回転子上で回転する永久磁石の移動に応じた信号を出力する働きをします(Figure 7)。

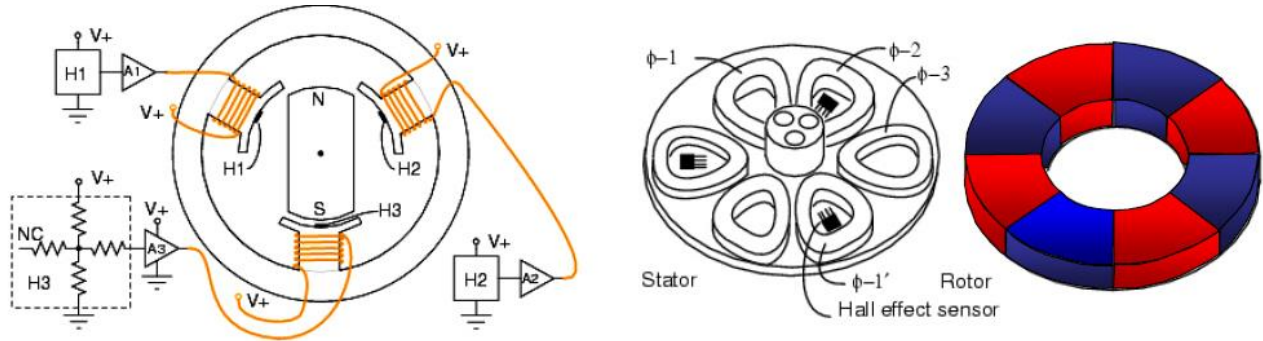


Figure 7. 3-phase BLDC Motor

Figure 8は、ホール・センサからの出力をどのように使ってモータへの供給電流を制御するのかが示しています。まずは、ホール・センサからの出力が論理回路を駆動します。次に、その論理回路がスイッチングのタイミングを決定します。今度はそのタイミングがゲート・ドライバ経由でパワー・トランジ

スタへ伝わり、それでモータが駆動されるというしくみです。3相ブラシレスDCモータは単相方式に比べると、小刻みにパルスが印加されるため、そのぶん振動が少なく、精密に制御できます。オン・セミコンダクターのLB1976は、ホール・センサを利用する3相ブラシレス・モータ・ドライバです。

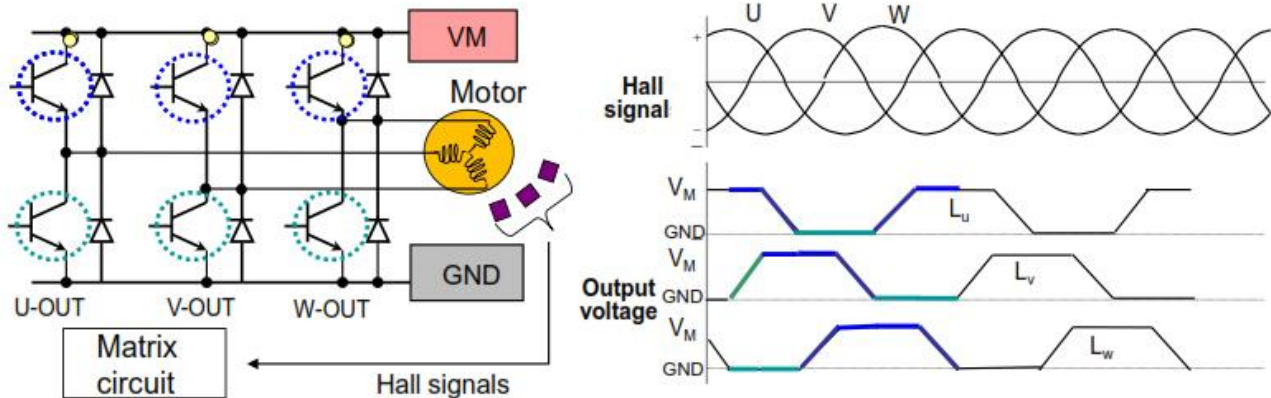


Figure 8. 3-phase BLDC Motor Drive with Hall Sensors

Figure 9に示したように各コイルのBEMF信号を検出することにより、センサを使わずに3相ブラシレスDCモータを制御することも可能です。モータの誘導電圧と、3つの各コイルへ印加される電圧の中間点とを比較するという方法を使います。こうして得られた信号を増幅して回転子位置検出回路へ供給します。それによって、3組のコイルにはそれぞれ120度ずつずれたパルスが供給されます。コントローラの中には、単純なコンパレータを使って各巻線の位相

を検出するものもあれば、外部のMCUを必要とするものもあります。オン・セミコンダクター製の3相センサレス・モータ・ドライバICであるLB11983は、MCUで制御しなくても、回転子位置検出のほか、始動、タイミング、スイッチング、サーマル・シャットダウン、飽和の各制御ができます。複雑な回路の場合は、速度と加速の制御については外部のMCUに任せる場合があります。

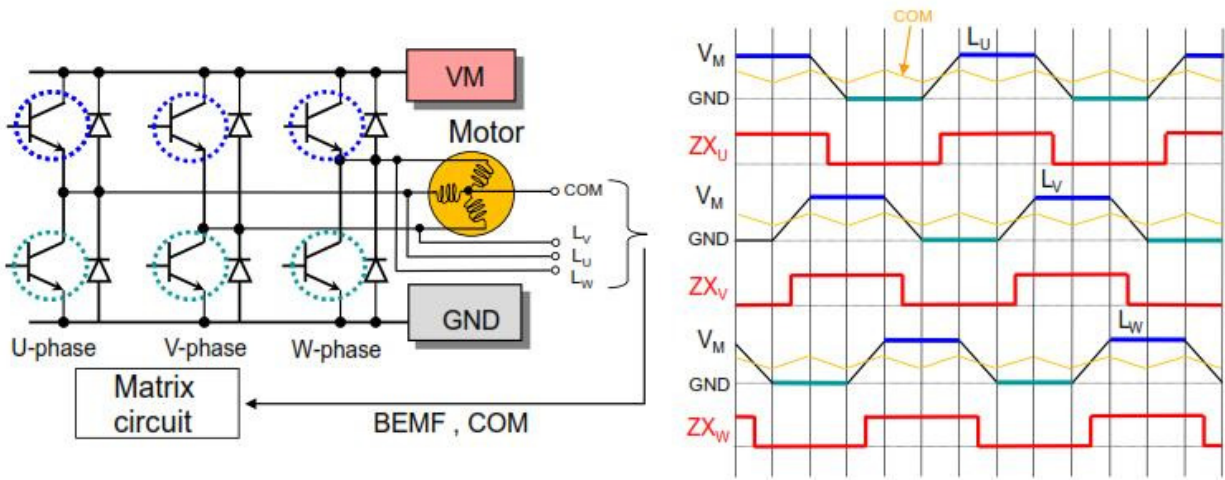


Figure 9. 3-phase Sensorless BLDC Motor Drive

BEMFを利用して回転子位置を検出するブラシレスDC回路は、BEMFの発生していない始動時に問題があります。その場合は通常、モータは未知の位置

から始動しますが、短時間の内に同調動作に移行します。

ステッパ・モータ

連続回転の不要なモータもあります。例えば「ステッパ・モータ」は、回転子を一定の角度ずつ回転させるモータであり、その軸は、いったん停止すると、再度動かすまで停止したままです。このモータはブラシも接触もありません。磁界を電氣的にスイッチングして電機子磁石を回転させる同期DCモータです。要するに、デジタル・パルスを機械的な軸回転に変換するわけです。デジタル・ステップをアナログ的な角度に変換するわけですから、機械的なDACであると言えます。

ステッパ・モータは、1回転を何ステップかに分割した同期DCモータです。ステップ(相)の数は、中心にある歯車形のコアの周囲に配された電磁石の数と同じです(Figure 10)。電磁石に供給する電流を制御することにより、精密な角度ずつ、モータを回転させることができます。

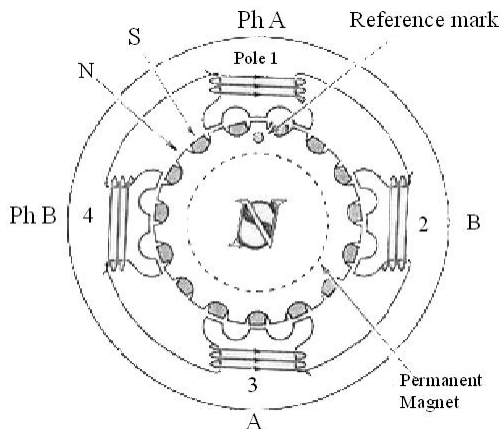


Figure 10. Hybrid Stepper Motor

ステッパ・モータには、「永久磁石型」「可変リアクタンス型」「複合型」という3つの基本型があります。

- 永久磁石型は、永久磁石の回転子と、積層鋼の固定子とを使います。位置決め分解能は一番粗い。
- 可変抵抗型は、位置決め分解能はやや細かくできるものの、ディテント・トルクがまったくなく、現在ではほとんど使われません。
- 複合型は、位置決め分解能を細かくできる可変抵抗型と、ディテント・トルクを強くできる永久磁石型とを組み合わせたものです。両者の長所を併せ持った構造と言えるでしょう。

2相ステッパ・モータが一番よく使われる構造です。巻線には「ユニファイラ巻」「バイファイラ巻」の2種類があります。

- ユニファイラ巻のステッパ・モータには、1相あたり巻線が2つあります。コイル電流の向きを反転させる必要があるため駆動するのが難しく、いつでも巻線の半数しか励磁されないという欠点があります。ユニファイラ巻線のステッパ・モータには4～5本のリード線があります。
- バイファイラ巻のステッパ・モータは、1相あたりの巻線は1つです。巻線に使われる銅の分量が約半分で済むため、ユニファイラ巻に比べてサイズ、重量ともに有利です。巻線を通る電流の向きを変える必要がないため、駆動は簡単です。こうした構造ですので、コイルから別のコイルへ簡単に電流が流れます。バイファイラ巻のステッパ・モータには6～8本のリード線があります。

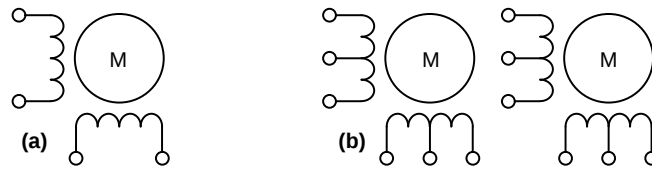


Figure 11. Unifilar (a) vs. Bifilar (b) Wings

ステッパ・モータの駆動

ステッパ・モータは通常、出力がPWM制御されるHブリッジによって駆動されます。Hブリッジの数は巻線1個あたり1つです。回転角はパルスの数に比例し、回転速度はパルスの周波数に比例します。

ステッパ・モータは一般に、連続回転モータよりも高い精度が求められるため、精密な制御が必要です。ステッパ・モータは、電磁石のオンとオフとを同期しながら交番させることで1ステップずつ動きます。これによって、1歯ずつあるいは1ステップずつ、固定子の周囲を回転子が回転します。しかしフル・ステップ駆動にすると、雑音と振動を引き起こすおそれがあり、場合によっては、決められた位置を行き過ぎてステップをいくつか飛ばしてしまうこと(脱調を起こすこと)があります。そうすると位置が分からなくなります。この問題を解消してくれるのが「マイクロステッピング駆動」です。マイクロステッピング駆動では、1ステップをさらに細かく刻んで回転子が動くようにすべての巻線を一緒に励磁します。

急いでバルブを閉じるような用途では、ステッパ・モータは何ステップも一気に回転します。こうしたケースでは「ストール検出」と「ストップ検出」

が重要になります。この場合は、ステップ数を数えて絶対的な位置を決めるオープン・ループ方式よりも「クローズド・ループ制御」のほうが遙かに望ましい。ほかに「適応型速度制御方式」もあります。この方式は、BEMFの増加を検知することにより、モータへ供給されるパルスの周波数を相応に高くするという方式ですので、バルブを閉じるにつれてバルブが段々重くなっても、極力短時間でバルブを閉じることができます。

オン・セミコンダクターのAMIS-30624 (Figure 12)は、上記の各機能をすべて搭載したシングルチップ・マイクロステッピング・モータ・ドライバです。内蔵された位置決めコントローラは、モータのタイプ、位置決め範囲、速度・加速・減速の各パラメータに合わせて設定が変更できます。ストール状態になっても、一体化されたセンサレス・ストール検出機能がモータを止めてくれますので、基準動作の際は静かで正確な位置較正ができ、機械的停止位置に近づいたときにはセミクローズド・ループ動作が可能です。AMIS-30624は、自動車、産業、ビル・オートメーションといった各市場における小規模な位置決め用ICであり、高電圧アナログ回路とデジタル機能とが同じチップに実装されています。

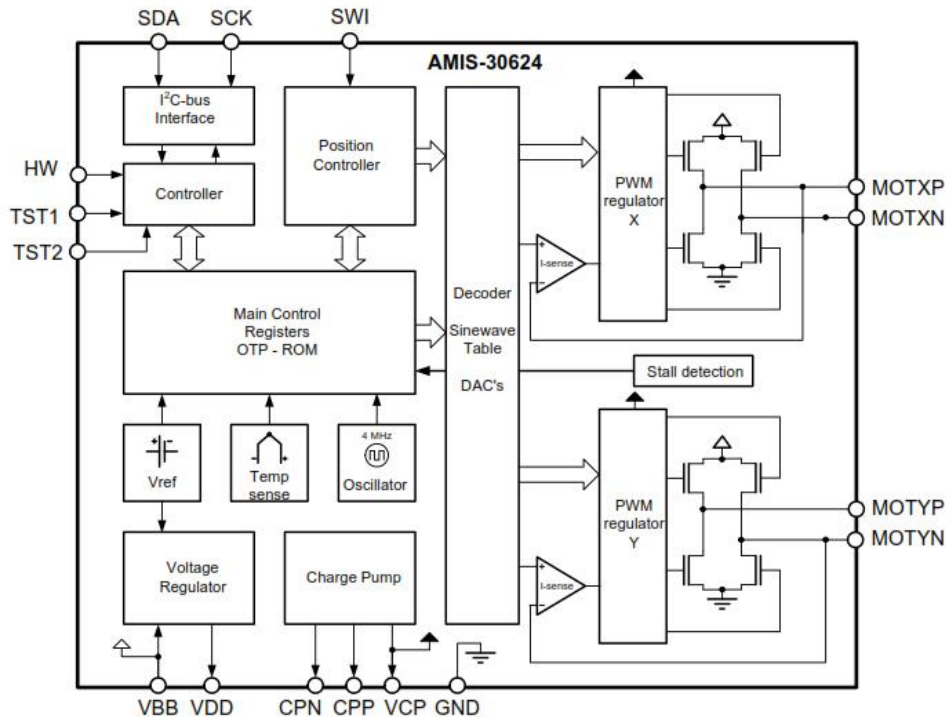


Figure 12. AMIS-30625-D Block Diagram

長所と短所

機械的、電氣的なデバイスはすべてそうですが、ステッパ・モータにも長所と短所があります。主な長所は以下のとおりです。

- 位置と速度はオープン・ループ方式で制御できる
- MCUからのデジタル信号で簡単に制御できる
- ブラシも整流子もないため耐久性が高い

一方で、こうした長所を生み出すために、以下のよういくつか犠牲にしていることがあります。

- 最適な制御をしないと、脱調が起きることがある
- 振動と雑音が問題になることがある
- 他のブラシレスDCモータほど効率がよくない

ステッパ・モータが必要かどうかは、当然、用途次第です。ステッパ・モータを使う場合でも、モータ・ドライバを適切に選べば、潜在的な問題は多少どころか一掃できる可能性があります。

モータ・ドライバの選択

どのような設計でも同じですが、最初に要求仕様を定めて、そこからトップダウン・アプローチでモータ・ドライバを選ぶのが最善の方法です。まずは以下の問いを自分にぶつけてみてください。

1. 目指すべき用途と目的は何か?
2. 一番ふさわしいモータは、単相、3相、3相センサレス、ステッパ、DCブラシなどのどれなのか?
3. 電源電圧の範囲は?
4. 出力電流、駆動電流は?

目指すべき用途にふさわしいモータを選ぶためには、電源電圧、出力電流の範囲以外にも、以下に示したいくつかの質問にあらかじめ答えておく必要があります。

ブラシDCモータ・ドライバを選ぶときに決めなければならないこと：

1. 速度制御が必要なのか、それとも一定の正転/逆転駆動が必要なのかを最初にはっきりしてください。速度制御が必要な場合は、サーミスタ、電圧、ダイレクトPWMのどれを使うのか?
2. モータ・ドライバの電源は? 一体型か、それともプリドライバ・タイプか?
3. 故障保護や電流検知などの機能は?

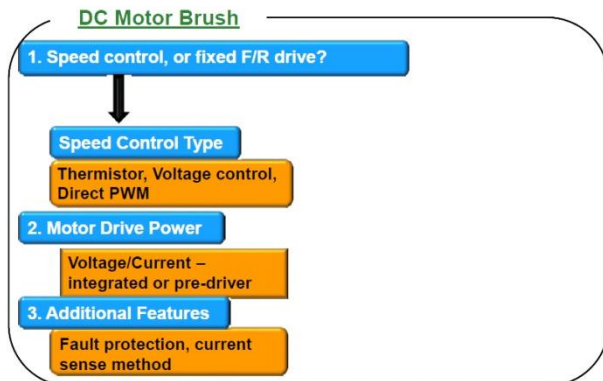


Figure 13. Selecting a Brushed Motor Driver

ブラシレスDCモータ・ドライバを選ぶときに検討しなければならないこと：

1. 外部信号による速度制御は必要か?
必要な場合は、サーミスタ、電圧、ダイレクトPWMのどれで速度制御をするのか?
2. 顧客が要求している出力信号は何か?
回転検出器(RD)信号が必要なのか、周波数ジェネレータ(FG)信号が必要なのか?
(回転検出器(RD)信号とは、モータがロックしているときの誤差信号のことです。周波数ジェネレータ(FG)信号は、回転子の回転数を出力します)。
3. 電流制限制御、ホール・バイアス制御、ロック保護など、その他の機能は必要か?

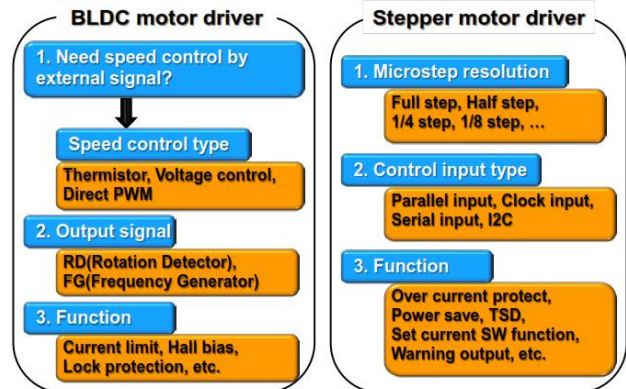


Figure 14. Selecting a BLDC or Stepper Motor Driver

ステッパ・モータ・ドライバを選ぶときに知っておくべきこと：

1. マイクロステップの刻み幅は、1/2ステップ、1/4ステップ、1/8ステップなどのどれなのか?
2. 制御入力信号は、パラレル、クロック、シリアルI²Cなどのどのタイプなのか?
3. 過電流保護、節電、TSD、設定電流に関するソフトウェア機能、警報出力など、その他の機能は必要か?

TND6041/D

要求事項が明確になり、必要なパラメータがだいたい分かったら、そのパラメータを基にしてオン・セミコンダクターのWebサイト www.onsemi.com で

モータ・ドライバを検索してください。多種多様なモータ・ドライバが用意してありますので、その内の1つくらいは目的の用途にかなうはずです。

ON Semiconductor及びONのロゴはSemiconductor Components Industries, LLC (SCILLC) の登録商標です。SCILLCは特許、商標、著作権、トレードシークレット(営業秘密)と他の知的所有権に対する権利を保有します。SCILLCの製品/特許の適用対象リストについては、以下のリンクからご覧いただけます。www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf。SCILLCは通告なしで、本書記載の製品の変更を行うことがあります。SCILLCは、いかなる特定の目的での製品の適合性について保証しておらず、また、お客様の製品において回路の応用や使用から生じた責任、特に、直接的、間接的、偶発的な損害に対して、いかなる責任も負うことはできません。SCILLCデータシートや仕様書に示される可能性のある「標準的」パラメータは、アプリケーションによっては異なることもあり、実際の性能も時間の経過により変化する可能性があります。「標準的」パラメータを含むすべての動作パラメータは、ご使用になるアプリケーションに応じて、お客様の専門技術者において十分検証されるようお願い致します。SCILLCは、その特許権やその他の権利の下、いかなるライセンスも許諾しません。SCILLC製品は、人体への外科的移植を目的とするシステムへの使用、生命維持を目的としたアプリケーション、また、SCILLC製品の不具合による死傷等の事故が起こり得るようなアプリケーションなどへの使用を意図した設計はされておらず、また、これらを使用対象としておりません。お客様が、このような意図されたものではない、許可されていないアプリケーション用にSCILLC製品を購入または使用した場合、たとえ、SCILLCがその部品の設計または製造に関して過失があったと主張されたとしても、そのような意図せぬ使用、また未許可の使用に関連した死傷等から、直接、又は間接的に生じるすべてのクレーム、費用、損害、経費、および弁護士料などを、お客様の責任において補償をお願いいたします。また、SCILLCとその役員、従業員、子会社、関連会社、代理店に対して、いかなる損害も与えないものとします。SCILLCは雇用機会均等/差別撤廃雇用主です。この資料は適用されるあらゆる著作権法の対象となっており、いかなる方法によっても再販することはできません。

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative