MOTOR³ LIGHT

PWMからセンサレス・ベクトル制御まで:原理とコーディング

挑戦!EVモータ制御プログラミング

電源/電池の評価試験に使う"電子負荷"とは何か

勝者が語るEVレース"優勝のための"必須技術

手づくりEV設計講座:構造用"材料"の特性

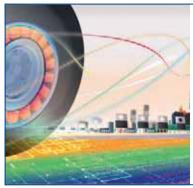
http://toragi.cqpub.co.jp

ご購入はこちら

http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MTR/MTRZ201603.htm

<mark>見本</mark> COHEST

第1章



モータの動作を感覚的に理解しよう!

回転の原理は同じ!? 「ブラシ付きモータ」と「ブラシレス・モータ」

藤澤 幸穂

「ブラシレス・モータのプログラミング」特集の最初は、ブラシレス・モータ動作の基本についておさらいである。ブラシレスDCモータの特性がどのように決まるかは、本誌のNo.1で詳しく特集した。ここではモータ制御用のプログラミング説明のために、最低限必要な「モータの構造」と「回転の原理」を理解しておこう。ここでは、より回転原理が単純なブラシ付きDCモータから解説する。

プラシレスDCモータ(以降は単に「ブラシレス・モータ」という)は、構造的に"ステータ(固定子:回転しない部分)"と"ロータ(回転子:回転する部分)"に分けることができます。そのステータには「3相のコイル(コイルの個数は3の倍数)」があり、ロータには「永久磁石(個数は2の倍数)」があります。ステータの3相のコイルには、相ごとに電流を転流(流れる向きを変える)させるように電流を流す、つまり交流を入力することでロータが回転します。

ブラシレス・モータでは,このコイルへ入力する交流波形を直流から生成する"インバータ"が用意されています。インバータには,リアルタイムで最適な波形生成をするために,高速演算ができるマイコンが搭載されています.つまり,ブラシレス・モータ制御の鍵は,リアルタムに波形生成をさせる適正なアルゴリズムとプログラミングということになります.

ということで,今回の特集テーマは,ブラシレス・ モータの制御プログラミングです.

1.DCモータはどうして回る? ~ブラシ付きモータとブラシレス・モータ~

ブラシ付きモータとブラシレス・モータ

ブラシレス・モータの回転原理を考える前に,もっと身近なブラシ付き DC モータ(以下は単に"ブラシ付きモータ")"から見ていきましょう.

ブラシレス・モータとブラシ付きモータは,モータ本体の構造がほぼ同じなのです.どちらのモータも,回転するロータと回転しないステータに,永久磁石

(マグネット)と電磁石(コイル)が取り付けられています、ただし、

ブラシ付きモータでは、

ロータ:電磁石,ステータ:永久磁石

• ブラシレス・モータでは,

ロータ:永久磁石,ステータ:電磁石 と逆になっています.

1.1 ブラシ付き DC モータが回る理由

では,モータが回る原理から始めましょう.そんなの知っているという方は,この章は飛ばしてください.ただし,モータ回転の原理をきっちり理解しておかないと,プログラミングができません.運動エネルギー,電気エネルギーの変換の話です.意外にちょっと面倒ですが,まずは感覚的に理解していきましょう。

右ネジの法則・ローレンツ力・左手の法則

ミ二四駆などの模型用モータとして知られているブラシ付きモータは, 乾電池などの直流電源に接続すると回転します. その回転原理は, いくつかの物理法則に基づいて説明できます(図1).

(1)右ネジの法則

この法則は図1(a)にあるように,銅線などの導体に電流を流すと磁界(磁力線)が発生するというものです.磁力線とは,磁界の強さと方向を矢印線で示したものです.磁界に垂直な単位面積を通る磁力線の数(これを磁束という)は,磁界の強さに比例します.

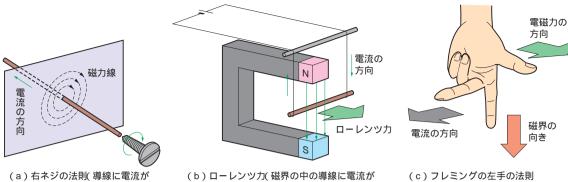
(2)ローレンツカ

磁界(磁力線)の中を電流が流れる導線があると, その導線に"ローレンツカ"という力(電磁力)が発生 します[図1(b)]. ローレンツカFは,次の式で表されます

$F = B \times I \times L$

B:磁束密度 , /: 導線に流れる電流 , L: 導線の 長さ

この式はモータのトルクを決める重要な式なので、、後で再度説明します.



流れると磁界が発生する) 図1 フレミングの法則とローレンツカ

(b) ローレンツ刀(磁界の中の導線に電流が (c) 流れると矢印の方向に力が発生)

(c) フレミングの左手の法則 (ローレンツカの働く向きを示す)

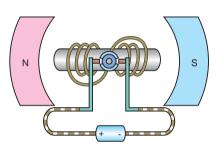
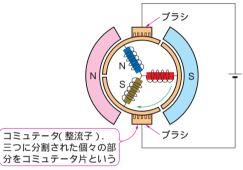


図2 ブラシ付き モータの構造

(a)回転原理を理解するための単純なモデル (2極2スロット)



(b) 実際の模型用ブラシ付きモータの構造 (2極3スロット)

(3)フレミングの左手の法則

ローレンツ力の働く向きをわかりやすく表したのがこの法則です.つまり,左手を図1(c)のような形にして,人差し指の指す方向を「磁界の向き」に,中指を「電流の向き」にすると,親指の方向に「力(ローレンツ力)」が発生するというものです.

モータの構造

動作原理をわかりやすく理解するため,ステータに永久磁石が2個(内側がN極とS極になるように設置),ロータに電磁石が1個という,きわめて単純なプラシ付きモータで考えます[図2(a)].

2個の永久磁石は内側がN極S極と逆になるように 固定設置されています(2極).

電磁石に電流を流すと,棒の両側にはN極とS極が表裏で発生します(2スロット).もし,この電流を逆に流すと電磁石の両側の極は逆になります[実際の模型用モータでは3スロット構成がほとんど.図2(b)参照],

モータの回転原理

モータは,いうまでもなく,永久磁石と電磁石の反発/吸引の力を利用させて回転させています.図3を見てください.

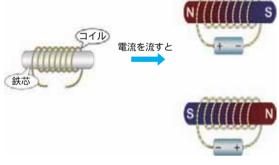


図3 きわめて原始的なモータのロータ部の仕組み電流の向きによってロータの両端に発生する磁極が変化する

棒状のコイルに電流を流すと電磁石になり,両端を中心に磁界(N極とS極)が発生します.コイルの電流の向きを変えると,当然ながら両端の磁界の極は反転します.

コイルの棒の中心部に回転する軸を設けます.これでコイルはロータになります.コイルの回転を妨げない近傍位置に永久磁石を2個置きます.2個は回転軸に対して反対方向です.この永久磁石がステータです.このロータとステータが,モータの原形です._

図4を見てください.これはモータが<mark>回転</mark>



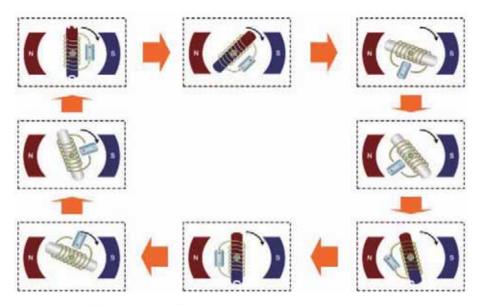


図4 きわめて原始的な DC モータの回転の原理 ロータ・コイルには直流電源が繋がれているが,モータの回転位置に合わせて"転流"を起こせば,モータは回転し続ける (図では転流発生を電池の回転で模式的に表している)ことができる

です.どこから見ていただいてもよいのですが,ロータのコイルの両端に磁極が発生し,ステータの永久磁石の磁極が異なると吸引力で近づこうと回転します. ただし,そのままでは電磁石と永久磁石が最近接したところでロータの回転は止まります.

そこで、コイルに流れる電流の向きを逆転すると、コイルと永久磁石の間に反発力が発生します.この電流の向きを変えるタイミングをうまく行うと、ロータは止まることなく回転が連続します.

モータの" 転流"の什組み

つまり,モータにはコイルの電流の向きを変える ("転流"という)仕組みがあるということです.じつは"ブラシ付きモータ"と"ブラシレス・モータ"は,この仕組みが違うのです(原理的にはここだけが異なる).

(1)ブラシ付きモータ

ブラシ付きモータでは,この転流を"整流子"と"ブラシ"という単純なメカニズムだけで実現しています(図2を再度参照).

(2)ブラシレス・モータ

"転流"というのは「電流が流れる向きを変える」ことでした.じつはこれは"交流"といえるのです.ただし,商用電源AC 100Vでは,50Hz/60Hzで一定です.モータの回転に合わせて転流させることはできません.では,モータの回転に合わせて転流させるように交流を発生させようというのが"インバータ"です.これについては後ほど詳しく説明します.

2極2スロットの限界と3スロット化

要するにモータは、磁力をうまく使って回転しています。ところで図4を見ておやっ? と思いませんか? ロータ・コイルが停止している位置から、スタートする場合を考えると、回転する方向が逆になる可能性がありますね。しかし、模型用のモータではそのようなことは起こりません。

模型用のモータでは,逆方向に回らないようにコイルを二つではなく,120度の角度で三つ用意しています(2極3スロットという).そしてコイルに電流を流すときは,一つでも三つでもなく,必ず二つのコイルに電流を流すようにします.これらの工夫で,必ず決まった方向に回転します.

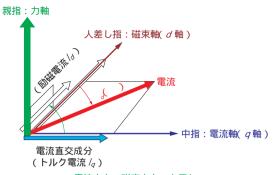
1.2 モータの特性 トルクと回転速 度を考える

発生するトルク

モータのように回転性能を表すパラメータとして "トルク"がよく使われます.トルクは「回転させる力のモーメント(力×回転半径)」を表します.ここでいう力とは,前述したローレンツ力です.「モータのトルクの源はローレンツ力」というわけです.ローレンツ力の式を再び示します.

< <トルクの源となる電磁力>>

電磁力F = 磁束密度B × 導体長/ × (電流/ × sin 導線単位長の力F = 磁束密度B × (電流/ × sin 先ほどの式と少し違います.電流/が<mark>ナス s</mark>n



電流方向 磁束方向:右回し 力方向:右ねじの進む方向

図5 フレミングの法則を少し厳密に図示すると

変わっています.コイルと磁束の位置関係が,フレミングの左手の法則と同じように90度の関係を保つように固定されていれば,前述のF = B × Iです.

ところが磁束に対して角度 をつけて導線を置くと,実際の導線の長さより短く見えます.この短く見える長さが,実際の長さ/xsin です.

しかし、上式で括弧にくくっているのは、/(エル)ではなく/(アイ)ですね、/と/とは見た目もまぎらわしいですね、でも、この式では掛け算しかないので、括弧のくくりは、どこでくくっても数式的には同じです、そこで、「/×sin 」の意味はあるのでしょうか?ここが重要なポイントです。

雷流と の関係をさぐる

フレミングの法則を少し厳密に図示したのが,図5です.3次元上の力関係なので,ベクトルの概念で説明しています.ここで $_{d}$ という角度が,前述の と同じことです(訳あって置き換えている).

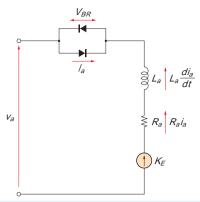
じつは、が90度のとき、流した電流はすべてト電磁力の発生につながります。が0度のときは、磁束と並行の向きで置かれた状態で、力も0です。が0の座標軸と、が90度の座標軸で示したのが図5なのです。

つまり,電流は「電磁力となる電流成分」 I_q と「電磁力にならない励磁電流」 I_d の成分からなるというわけです

この概念は, じつはベクトル制御の基本となるものです. この話は, 第4章以降で取り上げます.

モータのトルクを考えると

モータで重要なパラメータであるトルクに話を戻します.トルクTは,前述のように電磁力Fが回転半径 r上に発生したとき $\lceil F \times r \rfloor$ で表されます.同じモータで議論をするとき,r は同じなので,トルクは電磁力"F"と同じとして話を進めます(厳密性を欠くのですが).



モータ端子電圧 V_a は、プラシによる電圧降下 V_{BR} を無視すると、

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_E$$

となる. 定常状態で電流が一定であるときは,

$$v_a = R_a i_a + K_E$$

モータ発生トルクTは

$$T = K_T i_a$$

となり,この式は,慣性モーメントを加速するトルク,粘性制動トルク,クーロン摩擦トルクにも使用される.

$$T = K_T i_a = J \frac{d}{dt} + D + T_L$$

ここで、 K_E は逆起電力定数(Vs/rad)、 K_T はトルク定数(Nm/A)、は回転角速度(rad/s)、、しは慣性モーメント、Dは粘性制動係数、T、は負荷トルク・

図6 ブラシ付きモータ内部の等価回路と発電の計測法

「永久磁石の磁束密度が同じ」ならば、電流による 磁束密度によって発生するトルクが変わります、電流 を大きくすれば、磁束密度も上がり、トルクは増えま す、逆に「電流が同じ」とすれば、永久磁石の磁束密 度が大きいほどトルクが出るということです。

「モータのトルクを大きくする」には、

- (1)電流を大きくするか
- (2)磁束密度が高いコイルにする

ということになります.このことは重要ですので,言い換えておきます.

- (1)トルクは電流に比例する
- (2)トルクは電磁密度に比例する

大トルクを得るにはコイルの巻き数を...?

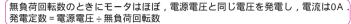
では,トルクを大きくしたい場合,コイルの巻き数を多くすればよいのでしょうか?

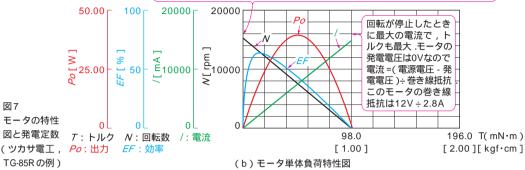
これには二つの問題があります.一つは物理的な限界です.コイルを多く巻くためには,体積が必要です.コイルの大きさがモータのボディに収まらなければなりません.むやみに巻き数を増やすことはできないのです.

もう一つの問題は"銅損"です.銅と

機種名	定格電圧	無負荷回転数	無負荷電流	定格トルク		定格回転数	定格電流
	(V)	(rpm)	(mA)	(mN·m)	(gf·cm)	(rpm)	(mA)
TG-85R	12	15620	512	15.19	155	13167	2800

(a) モータ単体仕様





はあります、その抵抗の大きさは長さに比例し、断面 **積に反比例します、そのため、コイルの巻き数が多く** なれば抵抗値は増えることになります.抵抗値が増え ると発熱は比例して増えます. 発熱するということ は,電気エネルギーの一部が熱エネルギーに変換され る、つまりエネルギー損失が増えるということで好ま しくはありません.

図7

さらに加えるなら,回転速度の問題があります.コ イルの巻き数とモータの回転速度は,反比例の関係に あります、コイルの巻き数を多くするほど「遅いモー タ」になってしまいます.

コイルを巻けば巻くほど「遅いモータ」になる理由

コイルの巻き数を増やすとコイルの磁力が強くなる ので速く回るはずでは...,と思われる方も少なくない かもしれません.

電源をつなげずに,回転させると発電機になるとい うことはご存じでしょう. でも電源をつないでいて も,モータが回転しているかぎり発電はしています (それを逆起電力という).

図6のように、模型用のブラシ付きDCモータにテ スタを接続して,手で回して実験するとわかります. つまり,モータを発電機としての働きを観察します. そこで,回転速度に比例した電圧が出力されているこ とが測定できるはずです.

じつは電源によってモータが回転しているときも、 自らの回転で発電しているのです.その発電分による 電圧が,電源(電池)の電圧と等しくなると電流はゼ 口となるはずなのです.

でも、実際はゼロになることはありません・ロータ を回転するためのエネルギー分が消費されているから です.

コイルの巻き数が増えれば逆起電力は上がり、モー タの回転速度が下がります、どれだけ回転速度が落ち るかといえば,電源電圧同じで無負荷であれば巻き数 に反比例します.たとえば,

巻き数:100ターン 回転速度:1000rpm のモータとすれば,巻き数だけを以下に変えると.

巻き数:200ターン 回転速度:500rpm 巻き数:20ターン 回転速度:5000rpm となります(モータの基本性能がその回転速度に耐え られる前提で).

各仕様のモータごとに「電源電圧÷無負荷回転速 度」は一定になります.これを"発電定数"と呼びます. つまり.

発電定数 = 電源電圧/無負荷回転速度 となり,モータの最大回転速度(無負荷時の回転速度) は,この発電定数で決まります.この値は,モータの 特性図から見つけられます(図7).

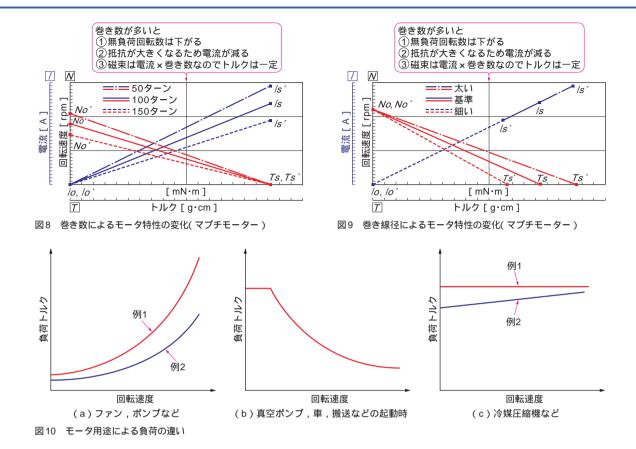
コイルの巻き数/巻き線径とトルクの関係

コイルの巻き数で,モータのトルクや回転速度の特 性が変わることは理解できたと思います.

この特性図を図8に示します.この図からコイルの 巻き数とモータ特性の関係をまとめると次のようにな ります.

- (1)巻き数が多いほど,無負荷時の(最大)回転速度が 遅くなる
- (2)巻き数が多いほど、同じトルクを得るのに電流は 少なくて済む(トルク定数が大きい)
- (3)巻き数がどうであっても,最大トルクは変わらない (これ以外にも読み取れることはあります.)

同様に,コイルの線径(つまり太さ)とモータ特性 の関係を図9に示します.そこから以下のよ



が導けます、

- (1)線径がどうであっても,無負荷時の(最大)回転速 度は変わらない
- (2)線径がどうであっても,あるトルクを得るのに必 要な電流は同じ(トルク定数が一定)
- (3)線径が太いほど,最大トルク値は大きくなる

モータ選定は用途別で

では,EV駆動などの用途別でのモータの特性を考 察します.用途別の,モータに求められる回転速度と トルクの関係を図10に示します.このように,用途 によりかなり異なります.また,モータの各種特性を 統合した関係図を図11に示します.

まず,クルマ(EV)で考えましょう[図10(b)]. モータの発生するトルクは,停止時(正確には停止か ら起動する瞬間)に最大電流が流れるため,最大トル クになります.

クルマとしては,低速時の加速性を重視とすると, モータの特性と合っています(モータの特性は,回転 速度が上がるほどトルクは下がる.エンジンは逆!). ただ,クルマの場合,高速走行になるほど空気抵抗が 急速に増えます.

また、図11のモータ特性図を見ればわかるように、

モータは最大トルクが出る近辺では効率は悪くなります。

つまり熱になるエネルギー損失が増えます.ただ し,すべての特性領域を使う必要はありません.最大 効率付近でおもに使うようにすべきでしょう. もちろ ん, 瞬時の使用であれば効率が悪い領域でも使ってよ いのです.

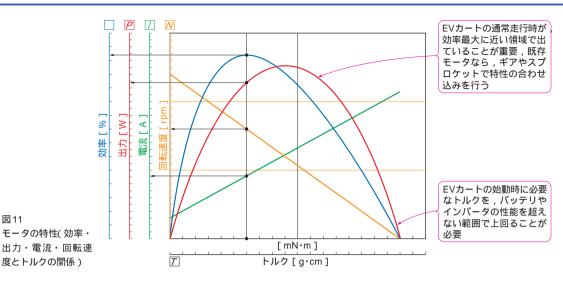
モータの用途では,逆に回転速度が上がってから も,負荷が大きくなりトルクも必要となることもあり ます. 例えばエアコンなどの圧縮機は, 圧縮が進むに つれて負荷が重くなります.

このように負荷が最大となる運転時の必要なトルク と回転速度を持つようなモータを選定する必要がある ということです.

磁束の特性を変えると...

永久磁石の特性を変えることで, もちろんモータの 特性は変わります.前述のように,磁束密度が高くな ると、トルクが増えることは、ローレンツ力の公式か ら理解できるでしょう. そこで, 永久磁石の磁性体の 選択で,磁束密度を変えることができます.

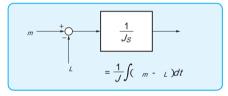
それだけではありません、1個の永久磁石でも,一 つの面で着磁の分布(端から端まで均一に着磁するか) 端を弱くするなど)を変えることができます(



●スピードは,何で決まるか?

重要な運動方程式

1 d



J: 慣性 [kg⋅m² 【一定 or 可変) : 角速度 [rad/s [検出可 or 不可)

_m: モータ・トルク [N·m 【 電流から計算可)

//: 負荷トルク [N·m]

「左辺] 「右辺] 回転数が一定=モータ・トルクと負荷トルクが等しい

図 12

図11

モータ・トルクは,どう考える?

モータの回転速 度を制御する

トルクに比例した電流を変えたい 電流を変えるために電圧を変える

かかる).これによってモータの特性も変化します.

巻き線も,巻き数や線径だけではありません.前で も少し述べましたが,モータの体積は無限ではなく有 限なので,巻き線の断面が円状なのか,楕円状なの か、それとも四角なのかによって、巻き数が変わるで しょう.

スロットにすかすかに巻くか,詰めて巻くかで,当 然特性は変わります.巻き線(マグネット・ワイヤま たはエナメル線ともいう)には,絶縁被膜の厚さでも 異なります.

マグネット・ワイヤは、コアと呼ばれる鉄心にボビ ンと呼ばれる絶縁材で覆われた上から巻きますが,そ れらの素材も重要です.

とくにコアには, 絶縁被膜で覆われた薄い電磁鋼板 を積層したものが使われます.磁束密度を高めるため には,鉄が必要なのですが,磁場が急速に変化する と、その鉄部で渦電流が発生し熱損失が生じてしまい ます注1.

そこで,積層することで,渦電流が起こりにくくして います.最近では,渦電流ができにくいアモルファス電 磁鋼板が登場しており,素材の改良が進んでいます.

巻き線など導線での熱損失は"銅損"といわれます. また電磁鋼板の渦電流による熱損失を"鉄損"といい ます、モータの効率を上げるには、これら二つの対策 が重要です. さらに, モータ体積中の電磁鋼板(鉄部) とマグネット・ワイヤ(銅部)の比率を変えることも できます. コアレス・モータというのもありますが, 鉄部がないので鉄損は生じません.

また,温度が高くなると,永久磁石の磁力も急に落 ちますので,発熱対策,つまり冷却も重要です.

注1:火を使わない電子コンロとしてIH機器が普及しています が、これは渦電流を利用したものです。あれと同じ原理で 熱損失が起こることは避けたいですね.

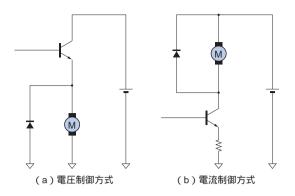
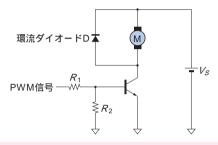


図13 電源/電圧制御によるモータ回転制御



トランジスタはスイッチング領域で使用される.PWM信号が 0VのときトランジスタはOFF, "H"レベルのときONになる PWM周波数が高いほど,モータはなめらかに回転する

(a) 駆動回路

図15 ムダな発熱のない電圧制御 PWM

1.3 ブラシ付きモータの制御

回転速度を制御する

ブラシ付きDCモータの回転速度制御は、電源電圧を可変することでできます。モータの回転速度は発生トルクと負荷トルクの平衡する、つまり釣り合っている点で決まります。電源電圧と負荷トルクが同じなら回転速度は一定です。電源電圧を変えるとモータ特性が平行移動して変わり、その発生トルクが負荷トルクとが釣り合って回転速度が一定になります。

負荷トルクが,その負荷特性や外乱によって変化しても一定の速度に保ちたいなら,負荷トルクの最大値と必要な回転速度からモータ電圧またはモータ電流を決め,回路でその電圧を制御します(図12).

電圧・電流をアナログ的に変化させ速度を制御する方法は図13にあるようにします.

電圧制御による方法

図13(a)に示した電圧制御方式のモータ制御回路 を少し見てみましょう.

アナログ的な電圧制御は簡単ですが,電圧を下げる ためトランジスタで熱にしているのが欠点です.この ため回転速度を下げても消費電力は一定です.つまり

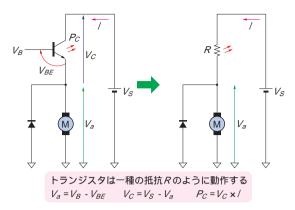
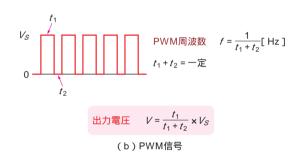


図14 トランジスタ使った電圧制御



効率が良くありません(図14). モータに1Aの電流を入れると,3Vをトランジスタに割り当てられ,そこだけで3Wを消費します. 結構大きな電力です.

効率の良い可変出力のスイッチング電源を使うという方法もなくはありませんが、規模が大きくなります。そこで、モータ制御としては、モータを直接PWM (Pulse Width Modulation)によって速度制御する方法がよく使われます。その回路図を図15に示します。これは、トランジスタのゲートに電圧を高速に印加することで、トランジスタのゲートを高速に開閉するというスイッチング回路です。トランジスタを使えば、モータの回転速度よりもずっと高速にスイッチングできます。トランジスタが開かれたときだけ、モータ本体に電流が流れます。そのオン時間とオフ時間の比率を変えることで、結果的に平均電圧を制御する方式です。平均電圧が高くなるとモータは高速に回転し、平均電圧が下がるとモータの回転速度も遅くなります(図16).

回転方向の制御を加えたい

先ほど図15で示した回路は効率良く回転速度の制御ができるのですが,まだ欠点があります.モータの逆回転ができないのです.モータの用途では,正回転/逆回転を繰り返す制御が少なくありません。

Redefining Power Conversion



Transphorm は高信頼性の 600V GaN パワーデバイスを提供しています。

EZ-Gal

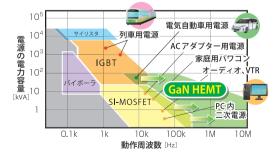
- ●世界初! 600V の高信頼性 GaN (9A/17A/21A/34A)
- 超高速駆動で小型設計
- スイッチング損失を極限まで低減
- ●多様な開発用評価ボード



GaN パワーデバイスがひらく新しい世界

GaN パワーデバイスならではの高速性能により、 Si デバイスでは実現できなかった小型、高効率な パワーシステムへの道がひらけました。

太陽光発電、IT機器用電源、家電用電源装置、 ACアダプタ、モーター駆動、さらには自動車用機器 など、あらゆるアプリケーションで省エネルギーに よる環境改善に貢献できます。



トランスフォーム・ジャパン株式会社

www.transphormjapan.com

神奈川県横浜市港北区新横浜 2-5-15 新横浜センタービル 9F FAX: 045-471-1386 TEL: 045-471-1370(代表) Twitter ID: @transphormjapan

富士通エレクトロニクス株式会社 045-415-5822

飯田通商株式会社

株式会社 UKC ホールディン

491006664036

02400

06664-03 (L) 2016.4.29